

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

**EFFECTOS PERJUDICIALES DEL VIENTO LATERAL
EN LA CIRCULACIÓN DE TRENES DE ALTA
VELOCIDAD, PROPUESTA Y ANÁLISIS DE
DIFERENTES MEDIDAS DE MITIGACIÓN.**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Nº 08401059



Juan Andrés Brunel Vázquez

Abril de 2009

ÍNDICE

Agradecimientos.....	vi
Resumen- Abstract	vii
Lista de símbolos.....	ix
Capítulo 1: Introducción.....	2
1.1.- Marco de referencia.	2
1.2.- Antecedentes.....	2
1.3.- Objetivos del proyecto.	5
1.3.1.- Objetivos generales.	5
1.3.2.- Objetivos específicos de cada apartado.	6
Capítulo 2: Estado del arte.....	10
2.1.- Consideraciones previas.....	10
2.2.- Estado de la técnica en la U.E. y extracomunitario.	12
2.2.1.- Mitigación de los efectos del viento lateral.....	12
2.2.2.- Medidas específicas empleadas.	15
2.2.3.- Sistemas de advertencia rápidos.....	15
2.3.4.- Diseño de infraestructuras.	19
2.3.5.- Diseños de trenes más eficaces frente al viento lateral.....	24
2.3.- Proyectos piloto en desarrollo.	26
2.4.- Normativa vigente.	29
2.5.- Conclusiones del estudio.....	31
Capítulo 3: Modelado de la influencia del viento en la explotación ferroviaria.....	36
3.1.- Identificación de las zonas de actuación.....	36
3.1.1.- Explotaciones ferroviarias afectadas.	36
3.1.2.- Descripción y climatología de las zonas afectadas.....	40
3.2.- Acercamiento teórico al problema.	48

3.2.1.- Dinámica de fluidos del viento.	50
3.2.2.- Parámetros y esfuerzos aerodinámicos.....	58
3.2.3.- Acciones aerodinámicas y dinámicas sobre el ferrocarril.	62
3.2.4.- Especificaciones técnicas de interoperabilidad.....	65
3.2.5.- Mecanismos de evaluación de la solución.....	68
3.3.- Breve descripción de los medios y programas empleados para el desarrollo del proyecto.....	69
3.3.1.- Programas de diseño gráfico.	69
3.3.2.- Programa de CFD.....	70
3.4.- Metodología empleada en las simulaciones con CFD.	71
Capítulo 4: Parámetros geométricos y aerodinámicos.	75
4.1.- Infraestructuras.....	75
4.1.1.- Descripción de LAV objeto del proyecto.	75
4.1.2.- Esquemas de vías.	76
4.2.- Material rodante.....	82
4.2.1.- Diseño y características de la Serie 102 de RENFE.....	83
4.2.2.- Diseño y características de la Serie 103 de RENFE.....	86
4.3.- Configuración de las barreras paraviento.....	89
4.3.1.- Emplazamiento de la barrera en la vía.	90
4.3.2.- Parámetros geométricos que definen las barreras.	94
Capítulo 5: Modelos y escenarios.	98
5.1.- Marco general de los ensayos.....	98
5.2.- Modelos de las infraestructuras.	103
5.2.1.- Modelo de vía sobre terraplén en terreno firme.	103
5.2.2.- Modelo de vía sobre viaducto.	105
5.2.3.- Modelo de los raíles.....	108

5.3.- Modelos del material rodante.	110
5.4.- Descripción y justificación de los ensayos que se van a llevar a cabo.	113
5.4.1.- Ensayos y análisis previos de evaluación.....	116
5.4.2.- Ensayos y análisis de optimización.....	116
5.4.3.- Análisis y valoración de las soluciones propuestas.	117
Capítulo 6: Ensayos y análisis.....	119
6.1.- Ensayos y análisis previos de evaluación.....	120
6.1.1.- Planteamiento general de los ensayos previos.....	121
6.1.2.- Ensayo 0: Determinación del emplazamiento más aconsejable para las barreras en la configuración de vía sobre terraplén.....	128
6.1.3.- Ensayo 1: Evaluación de la influencia de la infraestructura y la situación en la vía en los efectos del viento lateral sobre los dos trenes de alta velocidad.....	137
6.1.4.- Ensayo 2: Evaluación de la influencia de la altura de la barrera para-viento en los efectos del viento lateral sobre diferentes escenarios y trenes.	155
6.1.5.- Ensayo 3: Evaluación de la altura óptima obtenida en el ensayo 2, en condiciones especiales.	163
6.1.6.- Ensayo 4: Evaluación de la altura de barrera óptima obtenida en el ensayo 3, con simulaciones de dos trenes.	173
6.1.7. Conclusiones generales de los ensayos previos.	183
6.2.- Planteamiento general de los ensayos y análisis de optimización de las barreras para-viento.	188
6.2.1. Objetivos generales de los ensayos de optimización.....	188
6.2.2. Descripción general de los ensayos de optimización.....	189
6.3. Optimización de la barrera de protección lateral en la configuración de vía sobre viaducto.....	198
6.3.1.- Ensayo 5: Optimización de la altura de la barrera para la configuración de vía en viaducto.....	198
6.3.2.- Ensayo 6: Optimización de la forma de la barrera añadiéndole deflectores inclinados y huecos inferiores.....	206

6.3.3. Conclusiones del estudio de optimización de las barreras para-viento en la configuración de viaducto.....	229
6.4. Optimización de la barrera de protección lateral en la configuración de vía sobre terraplén.	231
6.4.1.- Ensayo 7: Optimización de la altura de la barrera para la configuración de vía en terraplén.	232
6.4.2.- Ensayo 8: Optimización de la forma de la barrera añadiéndole deflectores inclinados y huecos inferiores.....	239
6.3.5. Conclusiones del estudio de optimización de las barreras para-viento en la configuración de terraplén.....	255
6.5. Análisis técnicos y de costes de las mejores soluciones propuestas.	258
6.5.1. Estudio estructural.	258
6.5.2. Estudio de costes.....	261
6.5.3. Estudio de viabilidad.	266
Capítulo 7: Planificación y presupuesto.	272
7.1.- Planificación y programación.....	272
7.2.- Presupuesto.....	275
Capítulo 8. Conclusiones y futuros desarrollos.....	279
8.1.- Conclusiones.....	279
8.2.- Futuros desarrollos.....	280
Capítulo 9. Bibliografía.	283
Anexos.....	287
Anexo A. Datos meteorológicos	290
Anexo B. Método de discretización de las ecuaciones de flujo	319
Anexo C. Resultados de los ensayos previos.....	323
Anexo D. Resultado de los ensayos de optimización	355

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres, hermana y familia, gracias por haberme dado siempre lo que he necesitado y por confiar en ese loco que se pasa las horas delante del ordenador.

A Ana, por tu constante apoyo, tu aliento, tu paciencia y muchas cosas más.

A mis amigos y compañeros, estoy en deuda con todos vosotros, por vuestra desinteresada ayuda y consejos.

A mi tutor, Juan de Dios, por haberme dirigido en este proyecto con interés y sabios consejos, ha sido un placer trabajar contigo.

A tu recuerdo, se que hubieras leído este proyecto muy orgulloso.

RESUMEN- ABSTRACT

Esta publicación propone el estudio de la influencia del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad, y mediante el análisis con dinámica de fluidos computacional poder ofrecer soluciones para mitigar estos efectos.

Con el aumento de la velocidad de circulación en los ferrocarriles y su aligeramiento en cuanto a peso por eje, es cada vez más importante el efecto de las cargas aerodinámicas producidas por los vientos laterales fuertes sobre los trenes. Estos vientos causan inestabilidades en el equilibrio lateral del vehículo que pueden perturbar el normal funcionamiento del tren, causar daños en las instalaciones o incluso accidentes por vuelco o descarrilamiento.

El objetivo de este proyecto es el de aportar, estudiar y evaluar soluciones que mitiguen los efectos de las cargas aerodinámicas producidas por el viento lateral, tales como barreras para-viento de diferentes morfologías. El estudio se centra en las condiciones geográficas y operativas de la L.A.V Madrid- Barcelona, seleccionándose las zonas más afectadas por los efectos del viento lateral y considerando en el estudio los dos trenes de alta velocidad que dan servicio en la línea, así como las infraestructura, tanto de terraplén como de viaducto.

Se han medido mediante análisis bidimensionales y aproximaciones estáticas, diferentes diseños de barreras para-viento, evaluando sus resultados numéricamente. Para ello se ha empleado un programa comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD Computers Fluid Dynamics) que ha permitido un profundo análisis de las cargas aerodinámicas.

Las diferentes morfologías de barreras ensayadas, con múltiples alturas y soluciones aerodinámicas han permitido comparar distintas soluciones, y adaptar su forma a aquellas condiciones específicas que necesitan más protección, con lo que se han conseguido diseños de barreras óptimas, que consigue minimizar los esfuerzos aerodinámicos sobre la superficie del tren para cada una de las situaciones estudiadas. También se ha realizado una estimación de la viabilidad de las propuestas en base a las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad.

Palabras clave: Viento cruzado, CFD, aerodinámica lateral, tren de alta velocidad, barreras para-viento.

Abstract.

The present publication, suggest the study of the influence of strong cross winds on high-speed trains, and how to draw conclusions to mitigate these effects by means of analysis with computer fluid dynamics.

Due to the high speed increase in the railway traffic and the lightening of the axis weight, the effect of the aerodynamic loads produced on the trains by strong cross winds are becoming more important. These winds have a negative effect on the stability of trains travelling at high-speed. They can disturb the normal operation, cause damages in the infrastructures or even serious accidents like derailment or overturning.

The objective of this project is to provide, to study and to evaluate solutions and countermeasures, such as wind breaking structures with different morphologies, that mitigate the effects of the aerodynamic loads produced by the cross wind. The study is focused on the geographical and operative conditions of the high-speed line Madrid – Barcelona. The most affected zones by the cross wind effects have been selected and the two high-speed trains that operate in this line have been considered in the study. Both types of infrastructures on which the train runs have also been taken into account: bridges and ground tracks.

With two-dimensional analysis and static models, the aerodynamic forces acting on these two vehicles, and the improvements achieved in preventing the harmful cross wind effects by means of wind fence have been measured. A commercial CFD software (Computer Fluid Dynamics) has been used for this purpose and deep analysis of the aerodynamic loads have been carried out.

Different wind fence shapes have been studied, with several heights, bending angles on the top. This made possible to compare multiple solutions, and to adapt the form of the new devices to the specific situations in which more protection is required. The result was an almost ideal wind fence. These ideal fences minimize the aerodynamic loads on the train's surface. The results obtained have been compared with the experimental information of the Technical Specification for Interoperability.

Key work: Cross wind, CFD (Computer fluid Dynamics), Aerodynamics of high-speed railway train, windbreak, and wind fence.

LISTA DE SÍMBOLOS.

- A : Área frontal sobre la que incide el aire [m^2].
- B : Ancho de vía UIC [m]
- C_a : Coeficiente de resistencia aerodinámica.
- $C_s=C_x$: Coeficiente de resistencia aerodinámica por unidad de longitud en la dirección que sopla el viento. Coeficiente de afectación lateral u horizontal [m].
- $C_l=C_y$: Coeficiente de resistencia aerodinámica por unidad de longitud en la dirección perpendicular a la que sopla el viento. Coeficiente de sustentación o de afectación vertical [m].
- C_{m0} : Coeficiente de momento de las fuerzas aerodinámicas por unidad de longitud respecto al centro geométrico del vagón en el suelo [m.m].
- C_{m0b} : Coeficiente de momento de las fuerzas aerodinámicas por unidad de longitud respecto al centro geométrico del vagón en el suelo considerando al tren protegido por la barrera [m.m].
- C_p : Coeficiente de presión. Presión manométrica referida a la presión del viento sin perturbar adimensionalizada con la presión dinámica del movimiento sin perturbar.
- C_{fb} : Coeficiente de resistencia aerodinámica de la barrera para-viento [m^2]
- C_{mb} : Coeficiente aerodinámico de momento de la barrera para-viento [$m.m^2$].
- F_b : Fuerza que provoca el viento sobre la barrera [N]
- H : Altura del tren o del vagón [m].
- H_c : Altura del centro de gravedad del tren o del vagón [m].
- h : Altura total desde el suelo de la barrera para-viento[m].
- h_a : Longitud superior inclinada de la barrera para- viento [m].
- h_i : Altura total desde el suelo del hueco inferior de la barrera[m].
- L : Sustentación o componente de la fuerza aerodinámica en la dirección perpendicular a la velocidad del viento lateral no perturbado y sentido positivo hacia arriba [N].
- l : Sustentación o componente de la fuerza aerodinámica en la dirección perpendicular a la velocidad del viento lateral no perturbado por unidad de longitud característica [N/m].
- l_{caract} : Longitud característica, es la longitud del tren en la dirección perpendicular a la sección de la vía [m].
- M_{ov} = momento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la sección del tren respecto al centro geométrico del vagón en el suelo y positivo a balancear el tren a sotavento [N.m].
- m_{ov} = momento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la sección del tren por unidad de longitud característica respecto al centro geométrico del vagón en el suelo y positivo a balancear el tren a sotavento [N.m/m]
- M_{or} = momento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la sección del tren respecto a la rueda de sotavento del vagón y positivo a balancear el tren a sotavento [N.m].

- m_{ov} = momento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la sección del tren por unidad de longitud característica respecto a la rueda de sotavento del vagón y positivo a balancear el tren a sotavento [N.m/m]
- M_b : Momento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la barrera respecto de su base en el suelo y sentido positivo al balancear la barrera a sotavento[N.m]
- P : Presión local [Pa]
- P_∞ : Presión de la corriente sin perturbar corriente arriba de los modelos [Pa]
- Q_o : Sumatoria de las cargas estáticas por eje en dirección vertical [N].
- Q_i : Sumatoria de todas las reacciones verticales aplicadas sobre la rueda izquierda [N].
- Q_d : Sumatoria de todas las reacciones verticales aplicadas sobre la rueda derecha [N].
- S : Fuerza horizontal o componente de la fuerza aerodinámica en la dirección y sentido de la velocidad del viento lateral no perturbado [N].
- s : Fuerza horizontal o componente de la fuerza aerodinámica en la dirección y sentido del viento lateral no perturbado por unidad de longitud característica [N/m].
- U : Velocidad de referencia del fluido [m/s].
- U_∞ : Velocidad de la corriente del fluido sin perturbar [m/s].
- V_{tren} : Velocidad del tren [m/s].
- V_{viento} : Velocidad característica del viento [m/s].
- V_{equiv} : Velocidad del viento equivalente a la que incide contra el tren protegido por la barrera [m/s].
- $V_{relativa} = V_0$: Velocidad relativa del aire con respecto al tren [m/s].
- V_∞ : Velocidad de la corriente sin perturbar corriente arriba de los modelos [m/s].
- v_b : Velocidad básica del viento (UNE- EN 1991- 1-4) [m/s]
- W : Ancho del vagón del tren [m].
- Y_i : Sumatoria de todas las reacciones horizontales sobre la rueda izquierda [N].
- Y_d : Sumatoria de todas las reacciones horizontales sobre la rueda derecha [N].
- α_i : Angulo de inclinación del alero superior de la barrera [m]
- ΔQ : Descarga relativa del eje de barlovento.
- ρ : Densidad del aire [kg/m³].
- μ : Viscosidad del aire [Ns/m²].
- ν : Coeficiente de viscosidad cinemática del aire [m²/s].

1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

1.1.- MARCO DE REFERENCIA.

El presente proyecto se encuadra dentro del área de dinámica y medidas de seguridad ferroviaria, en concreto en el estudio de la influencia del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad así como el análisis de medidas de mitigación en forma de barreras para-viento.

El área de conocimiento se corresponde a los códigos UNESCO 3323 (Tecnología de Los Ferrocarriles) y más concretamente a las líneas de investigación 3323.02 (Equipo Ferroviario) y 3323.05 (Material Rodante).

El desarrollo de este proyecto se realiza dentro de la línea de trabajo de planificación y dimensionamiento de instalaciones ferroviarias que lleva a cabo el CITEF (Centro de Investigación de Tecnologías Ferroviarias) y con aplicación en las líneas ferroviarias de nueva construcción en las cuales está participando este Centro.

CITEF nace entro de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, en Noviembre de 1998 con el objeto de incrementar el desarrollo en proyectos nacionales e internacionales y la formación de Ingenieros Industriales en el mundo del ferrocarril.

El objetivo del proyecto es realizar un profundo estudio sobre la afectación del viento lateral en la circulación de los trenes de alta velocidad, y en base a este trabajo diseñar y analizar medidas de mitigación en forma de barreras para-viento.

1.2.- ANTECEDENTES.

Es un hecho que las comunicaciones por ferrocarril han sufrido importantes cambios en las últimas dos décadas, tanto en lo que se refiere al material rodante como en lo referente a las infraestructuras sobre las que circulan.

Estos avances han ido encaminados hacia un aumento de la velocidad de circulación, para reducir los tiempos de recorrido y poder aumentar las frecuencias, y se han conseguido gracias a las mejoras físicas, mecánicas y tecnológicas de los trenes y de las vías.

El aumento de la velocidad de circulación en los ferrocarriles lleva asociado generalmente un aligeramiento en cuanto al peso por eje. Esto, que a simple vista solo podría tener ventajas como la reducción del tiempo de trayecto o la bajada del consumo para iguales regímenes de velocidad, también lleva asociado una serie de riesgos y efectos negativos.

Este proyecto pretende centrarse en uno de estos efectos, el provocado por los vientos al incidir de forma transversal sobre las composiciones, y sobre todo tratar de aportar soluciones que mitiguen estos efectos negativos para ayudar al desarrollo de una comunicación ferroviaria de alta velocidad, confortable, segura y económica.

El aumento de las velocidades de circulación hace cada vez más importante el efecto de las cargas aerodinámicas producidas por los vientos laterales fuertes sobre los trenes. Se pueden clasificar los efectos de los vientos transversales en dos grupos:

- Son la causa de inestabilidades que pueden perturbar el normal funcionamiento del tren cuando circula a altas velocidades, obligándoles a bajarlas o provocando en el peor de los casos accidentes por vuelco o descarrilamiento si no se toman las medidas necesarias para mitigar estas inestabilidades.
- Por otro lado, estas inestabilidades en el material rodante pueden causar daños en las instalaciones, sobre todo en las vías. Estos daños generalmente son costosos de reparar ya que precisan de equipos de mantenimiento altamente sofisticados.

El desarrollo tecnológico del tren y sus infraestructuras en los últimos años no ha hecho más que acrecentar el problema, ya que las velocidades de marcha han aumentado de manera considerable, en España por ejemplo se han alcanzado velocidades superiores a los 300km/h en trenes comerciales, y las infraestructuras cada día cuentan con más tramos en viaducto y sobre terraplenes que acrecientan los efectos del viento lateral. Por ello se hace necesario el estudio de la influencia de los vientos cruzados y como mitigar estos efectos.

La seguridad de los trenes frente al viento lateral es algo multidisciplinario, que involucra a la dinámica del vehículo y a su diseño aerodinámico. En la mayoría de los casos requiere de una evaluación de riesgo que tenga en cuenta

estos efectos combinados en un tren que funciona sobre una línea específica, y no se puede abordar el problema de manera general.

El vehículo más crítico en un tren es, obviamente, el que tiene que ser analizado. En una composición de tren homogénea, por lo general es el coche principal el que está sometido a las cargas aerodinámicas más grandes, y por tanto será el caso más crítico.

El comportamiento del viento lateral en un ferrocarril viene determinado por los puntos siguientes, que sin embargo, como se indicó antes, deben ser considerados conjuntamente y no individualmente:

- El diseño y la forma externa del vehículo, las características de la marcha, parámetros de la vía como el radio, la pendiente, etc.
- Condiciones meteorológicas en la vía férrea, en particular, la presencia local de vientos fuertes sobre ésta.
- Circunstancias agravantes, como marchar sobre altos terraplenes y viaductos donde los vientos son ráfagas normalmente mayores, ya que la velocidad en la capa límite atmosférica crece al aumentar la altura. Además hay que tener en cuenta que al nivel del terreno hay innumerables elementos, como pueden ser la vegetación o la orografía y rugosidad del mismo, que pueden disminuir el efecto del viento.

Todas las administraciones que operan trenes de alta velocidad se han planteado estos problemas y como paliarlos. Aunque en el estado de arte se describen las principales actuaciones y quienes las están llevando a cabo, en este apartado se definirán las que se consideran las tres vías principales de estudio:

- Limitación de la velocidad de operación del tren. Esta es la medida en la que actualmente más se está trabajando en España. Básicamente consiste en frenar el tren de manera automática o manual en aquellos tramos en los que se produzcan alertas por vientos fuertes.
- El diseño de la forma exterior del tren. El diseño aerodinámico de los trenes es y será objeto de profundos estudios, pero la mayoría de ellos van orientados hacia la disminución de la resistencia aerodinámica. Si bien es cierto, que los diseñadores japoneses

cada vez tiene más en cuenta los efectos de los vientos laterales a la hora de diseñar sus trenes, y por ejemplo en España TALGO en sus boletines indica que su modelo 350 tiene un diseño que mitiga los efectos del viento lateral.

- El diseño de infraestructura y superestructuras más eficaces, esto incluye por un lado la forma y diseño de barreras o parapetos laterales. La disposición de barreras en los laterales de las vías es una de las contramedidas más eficaces, si bien su diseño es muy complejo, ya que pueden perturbar la corriente de viento provocando efectos perjudiciales. Además es una medida cara, y es por ello que su empleo aún no es muy común salvo en grandes viaductos. Y por el otro lado el diseño propio de la infraestructura, con vías inclinadas a barlovento, viaductos de formas especiales, etc.

1.3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO.

Dada la extensión del proyecto, es necesario especificar los objetivos en dos grandes grupos, por un lado se definen los objetivos generales que este proyecto pretende alcanzar y por otro lado se plantean los objetivos específicos de cada uno de los capítulos y apartados que conforman el proyecto.

Estos objetivos específicos de los capítulos, no constituyen en ningún modo el fin que busca el proyecto, pero si son el medio para ir alcanzando etapas que acerquen a los objetivos generales. Es por ello que a medida que se vaya avanzando en la lectura del proyecto, los objetivos específicos se irán pareciendo más a los generales.

1.3.1.- OBJETIVOS GENERALES.

Este proyecto pretende centrarse en esta última contramedida del apartado anterior, es decir, en el estudio de actuaciones que sean capaces de mantener la velocidad de circulación lo más alta posible. Con este fin, se plantean dos objetivos generales a cumplir:

El primero es realizar un estudio previo en el que se evalúen las características del viento lateral en el entorno de diversos tipos de plataforma ferroviaria, de trenes y de escenarios, a fin de cuantificar en qué medida estas diferencias afectan a los esfuerzos que actúan sobre cada tren.

El segundo es proponer, diseñar, estudiar y evaluar medidas, tales como barreras para-viento de diferentes formas, que mitiguen estos efectos en cada una de las situaciones estudiadas. También estudiar la viabilidad de estas propuestas en diferentes marcos y comparar los resultados obtenidos con los datos experimentales de otros estudios y proyectos.

Finalmente se proporcionarán una serie de recomendaciones fundamentadas, tanto desde un punto de vista técnico, como económico y de seguridad.

Este proyecto pretende centrarse en el ámbito Español, por lo que será necesario analizar las características aerodinámicas, fuerza lateral y momento de balanceo, de trenes comerciales de alta velocidad que circulen por una línea concreta del territorio nacional en la que se den fuertes vientos laterales, analizando las distintas alternativas posibles, tanto de esa línea de alta velocidad, vías sobre viaducto, vías sobre terreno firme, como de las barreras, diferentes alturas, geometrías, emplazamientos, etc.

Por tanto, el tema central del proyecto es el estudio de la influencia del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad, y mediante el análisis con dinámica de fluidos computacional poder ofrece soluciones para mitigar estos efectos.

1.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE CADA APARTADO.

El proyecto se encuentra dividido en capítulos o apartados, que marcan su desarrollo y evolución. A continuación, y a modo de esquema se definen cada una de estas partes y sus objetivos específicos.

Una primera en la que nos centramos en la ejecución del estado del arte de la tecnología aplicada a nivel nacional, UE, Japón y Corea. Ésta etapa tiene como objetivo el convertirse en una fuente de ideas que permitan fijar claramente cuales van a ser las pautas y líneas de trabajo, además de formar una base bibliográfica y de referencias para poder realizar consultas y estudiar otros trabajos centrados en el mismo campo de manera que sean una herramienta también para comparar nuestros futuros resultados.

A continuación se define la influencia del viento en la explotación ferroviaria, identificando las zonas de actuación y su problemática, definiendo el problema desde un punto de vista práctico y teórico. Se describen los medios y

programas con los que se va a hacer frente al proyecto y el porqué de su empleo, además de definir una metodología de trabajo en función de estos medios propuestos. Todo ello conforma el tercer capítulo del proyecto, y su objetivo es plantear el problema desde diferentes puntos de vista y fijar y describir los medios con los que se piensa abordarlo.

El capítulo cuatro recogerá todos los parámetros necesarios, y que definen las múltiples variables del problema. Éste capítulo tendrá como objetivo enumerar todos aquellos parámetros, geométricos y aerodinámicos que permitan enfocar el problema en función de ellos. De esta manera se consigue acotar el problema y fijar claramente un marco de acción, en función de las condiciones físicas de las infraestructuras, de las características de los trenes, de los modelos de viento y por supuesto de las distintas alternativas de barreras de protección lateral.

Estos datos necesarios para el desarrollo del proyecto se pueden dividir en tres grandes grupos: datos del viento (dirección, velocidades, frecuencia, etc., en puntos cercanos a las vías de alta velocidad), datos de las infraestructuras (perfiles de vía, cortes transversales, velocidades de paso de trenes por tramos, zonas conflictivas, etc.) y datos relativos al material rodante de alta velocidad (dimensiones y formas, velocidades máximas, aspectos aerodinámicos, etc.).

Luego de fijar los parámetros del problema, a continuación se describirán en el capítulo cinco, los modelos que se van a emplear en base a estos parámetros. Una definición clara de los modelos que se van a ensayar servirá para enfocar al lector sobre el escenario en el que se van a realizar los ensayos y para orientar el porqué de cada uno de los ensayos, su justificación y descripción, así como los resultados que cabe esperar de cada uno de ellos.

Una vez planteado el escenario, en el capítulo seis se realizará el preproceso, postproceso y análisis de los ensayos. Primero se plantearán unos ensayos de carácter preliminar, que permita realizar el estudio previo de las características del viento lateral en cada escenario y focalizar el problema hacia los ensayos más útiles. Se elaborarán los primeros análisis con CFD, con el objetivo de crear una primera idea del estado del fenómeno y de la influencia de los diferentes parámetros en la afectación lateral

Serán ensayos cualitativos que permitirán aclarar las particularidades del campo fluido, comprobar que los órdenes de magnitud son correctos, y comparar

las diferencias de afectación sobre los trenes en función de sus emplazamientos en la vía, del tipo de infraestructuras y del modelo del propio tren.

Con los resultados y el posterior análisis de los ensayos previos se procederá a la realización de los ensayos de optimización, donde se abordará el estudio en detalle de las diferentes formas de barreras para-viento, con el objetivo de diseñar barreras lo más eficaces posibles para cada situación planteada.

Estos ensayos se realizarán también con CFD, pero requerirán de un nivel de detalle mayor, se emplearán formulaciones más complejas y se manejarán más variables.

A partir de estos ensayos ya se dispondrá de la suficiente información para plantear las mejores soluciones al problema. Con aquellas medidas que resulten más eficaces para la resolución de éste, es decir, que mitiguen los efectos del viento lateral, se procederá a evaluar sus características desde un punto de vista técnico y económico, para poder definir su viabilidad de implantación.

Todos los ensayos planteados en este capítulo llevarán asociado un preproceso donde se desarrollaran los modelos, un postproceso de recogida de datos y gráficos, y un análisis donde se analizarán los resultados y a partir del cual se elaborarán las conclusiones pertinentes.

Por último se redactarán unas conclusiones finales que permitan extraer los puntos e ideas más importantes de los ensayos y que llevarán a desarrollar una parte final donde reflejar si se ha alcanzado a cumplir los objetivos. Además en base a estas conclusiones se plantearán futuros desarrollos y vías de investigación.

Aparte de esto se presentarán una serie de anexos que recojan explicaciones, tablas y tomas de datos, de manera que la memoria abarcará los aspectos generales con los resultados y conclusiones más relevantes y los anexos la información necesaria para sustentarlos.

Estos son los objetivos particulares de aquellos apartados del proyecto que conforman el grueso del desarrollo. Del resto de apartados, planificación y presupuesto, y referencias, están claros sus objetivos y no se considera necesario definirlos.

2. ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.

2.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS.

Este proyecto pretende centrarse en los efectos perjudiciales de los vientos cuando inciden de forma lateral sobre las composiciones, y sobre todo tratar de aportar soluciones que mitiguen estos efectos negativos.

En el capítulo anterior, en el apartado antecedentes, se han relacionado los problemas y las vías de solución, algunas de las cuales serán objeto de estudio en este proyecto. En este capítulo se profundiza en muchas de las publicaciones al respecto, con objeto de conocer el estado del conocimiento del problema de las cargas laterales en trenes de alta velocidad.

Hasta hace muy poco, los trenes eran muy pesados y lentos por lo que el viento no representaba amenaza alguna para su circulación. Sin embargo, hoy día estos trasportes son muy ligeros y veloces. Por consiguiente, el viento, sobre todo el lateral, supone un peligro constatado.

Las cargas aerodinámicas que actúan sobre un tren bajo vientos laterales han despertado el interés de muchos investigadores a lo largo de toda la historia del ferrocarril, existiendo al respecto un número razonable de trabajos publicados.

Las operadoras de trenes de alta velocidad, han desarrollando en los últimos años procedimientos para mantener la operación segura bajo la influencia de vientos de costado fuertes. Sin duda alguna, ha sido la seguridad en el servicio lo que ha especificado con mayor medida los objetivos de estos trabajos, y más a raíz de que se hayan producido algunos accidentes ferroviarios a causa de fuertes vientos de costado.

En este área lo que más se ha estudiado ha sido la probabilidad de volcado de trenes, de descarrilamiento por el remonte de pestaña, o los daños colaterales que se puedan causar a la vía.

Evitar descarrilamientos y otros incidentes desafortunados es, por tanto, una de las consecuencias de este tipo de investigaciones aplicadas, cuyos resultados revierten directamente en la sociedad.

Como se recogía en los antecedentes, todas las administraciones que operan trenes de alta velocidad se han planteado estos problemas y han desarrollado y desarrollan proyectos de distinta índole con el objetivo de paliar los efectos negativos del viento lateral.

La evaluación de las curvas de viento características se realiza mediante simulaciones multicuerpo, donde las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el vehículo son medidas en un túnel de viento o calculadas con la dinámica de fluidos computacional (CFD), dependiendo de los medios del agente que realiza el estudio y la publicación.

Hay que observar, sin embargo que los ensayos en túneles aerodinámicos de ferrocarriles son habitualmente realizados con aproximaciones estáticas donde la interacción entre el aire y el tren se reproduce por medio de modelos estacionados expuestos a la acción del flujo de aire del túnel. Obviamente, este método de fijar el tren en la cámara de ensayos no tiene en consideración el movimiento relativo del tren con respecto al terreno.

Si bien ha habido algunos intentos de mover el modelo a través del túnel aerodinámico (2) o desplazar una banda simulando el movimiento del terreno respecto al tren (3), el camino utilizado mayoritariamente para determinar la aerodinámica del tren ha sido el de fijar el modelo de tren en la cámara de ensayos.

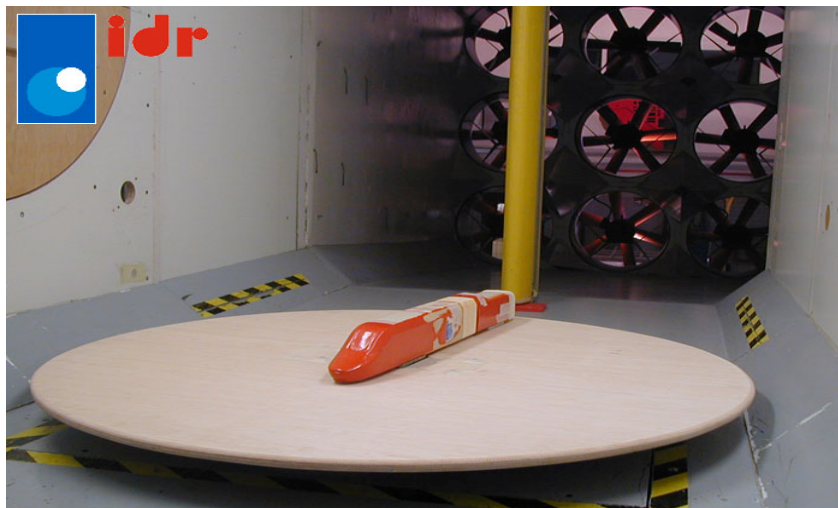


Imagen 2.1: Túnel del viento del IDR-UPM. Como se puede observar el tren simulará ensayos estáticos ya que el suelo no se mueve.

Esto también es una práctica bastante habitual en los ensayos con CFD, como se verá más adelante (4), ya que la simulación del tren en movimiento requiere de Hardware muy potente, porque es necesaria una simulación en tres dimensiones de un modelo lo suficientemente grande como para poder representar la capa límite que se forma en el sentido del movimiento del tren.

2.2.- ESTADO DE LA TÉCNICA EN LA U.E. Y EXTRACOMUNITARIO.

2.2.1.- MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL VIENTO LATERAL.

Tanto en la U. E como en el ámbito extracomunitario han surgido algunos proyectos que han tratado de encontrar soluciones, de forma general, o específica para un tipo de tren, al problema del viento lateral.

A continuación se repasarán algunos de los que aportan un mayor grado de estado del conocimiento general, de manera que puedan ser útiles sus conclusiones y/o desarrollos para el planteamiento de este proyecto.

Proyecto TRANSAERO.

Uno de los trabajos más importantes y que sentó la base de muchos futuros proyectos es el proyecto TRANSAERO (1994-1998). Este proyecto estuvo dedicado al efecto de vientos laterales sobre trenes y fue realizado por la compañía alemana de ferrocarriles, en adelante DB (Siglas en Alemán de Deutsche Bahn), y por la empresa estatal francesa que se encarga de la explotación de los ferrocarriles en ese país, en adelante la SNCF (siglas en francés de Société Nationale des Chemins de fer Français). Además colaboraron numerosas universidades inglesas y francesas, como la Universidad de Erlangen y la Universidad de Nottingham.

Este trabajo incluyó medidas a escala real de fuerzas de viento laterales sobre un tren DB Inter-Reggio (Servicio de ferrocarriles regionales de la DB, en adelante IR), asociadas con pruebas en túnel de viento y cálculos en CFD.

Las medidas a escala real eran sólo parcialmente acertadas ya que sólo era posible medir las cargas del viento sobre el bogie delantero, pero sin embargo demostraron el efecto principal de las vallas para-viento, que es que reducen el momento de vuelco.

Las pruebas de túnel aerodinámico fueron realizadas usando los modelos a escala 1/50 de los vehículos IR, tanto con estos vehículos estáticamente montados dentro del túnel de viento como con los vehículos en movimiento. Otra vez los resultados mostraron que las mayores reducciones de momento en rodadura se alcanzaban con vallas para- viento como es obvio.

Las pruebas con CFD fueron realizadas usando un modelo tridimensional RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations), y produciendo una imagen detallada del campo de flujo alrededor del tren. Sin embargo la comparación detallada de estos resultados con los datos experimentales no fue posible debido a las limitaciones en el Hardware.

Los resultados de este proyecto dieron lugar una extensa publicación con el mismo título que el proyecto (5), así como a numerosas divulgaciones y conferencias, algunas de ellas bastante relevantes y que han constituido base importante de futuros proyectos.

Proyecto DEUFRAKO

Más tarde este trabajo sería continuado por la DB y la SNCF en el proyecto DEUFRAKO. Este trabajo partió de los resultados anteriores e implicó un número mayor de aspectos diferentes:

- a) Medidas en túnel aerodinámico de fuerzas de viento laterales sobre trenes SNCF y DB.
- b) Cálculos en CFD de fuerzas de viento laterales sobre dichos trenes.
- c) Medidas a escala real de las fuerzas provocadas por vientos laterales en trenes en movimiento.
- d) Un estudio numérico de los efectos de la suspensión de vehículo sobre las características de vuelco.
- e) Análisis de datos meteorológicos, y el desarrollo de sistemas de advertencia y alarma para vientos fuertes.
- f) Evaluación del riesgo de vuelco para un número de líneas de alta velocidad, y el desarrollo de una metodología codificada para evaluar este riesgo.

Este extenso proyecto a dado lugar a numerosas publicaciones y estudios, además de un libro con su mismo nombre (6), pero ninguno de ellos ha dado

resultados que se puedan generalizar, por lo tanto no son válidos para todos los modelos de trenes, aunque si pueden dar una idea de la problemática y posibles medidas eficaces para los modelos de trenes estudiados.

Proyecto de ITALCERTIFER

Finalmente se debe comentar el trabajo en ejecución, para medir fuerzas de viento laterales y momentos sobre modelos a escalas grandes y en movimiento, en un túnel aerodinámico ambiental, que se lleva a cabo en la Politécnica de Milán.

Este trabajo, que está comisionado por ITALCERTIFER (el Consejo Italiano de Certificación de Vehículos Ferroviarios), consiste en pruebas en túnel aerodinámico a escala 1/20 con modelos en movimiento en un túnel ambiental muy grande (14m x 4m en la sección).

Las fuerzas y momentos han sido medidos usando medidores de presión internos con los vehículos en simulaciones sobre terraplén y viaducto. El tamaño del túnel hace que las condiciones de viento estén bien reproducidas.

El movimiento del modelo es producido por la gravedad, por lo que las velocidades modeladas no son altas - del orden de 8 a 10m/s. Los datos de túnel aerodinámico son usados para obtener entradas aerodinámicas para los vehículos que luego son introducidos en el modelo de simulación dinámica del vehículo. Esto permite que las características de marcha y desplazamientos de vehículo sean calculados para una variedad de condiciones de viento turbulento.

Esta instalación experimental permite también realizar una simulación apropiada de la situación de un vehículo móvil sobre un terraplén con viento cruzado.

Otras publicaciones

Además de esto se han publicado muchos otros artículos que tratan de la determinación, ya sea con técnicas experimentales en túneles aerodinámicos (7 y 8) o por métodos numéricos (9) de las cargas aerodinámicas en trenes expuestos a vientos laterales cuando se desplazan sobre el terreno, aunque también hay que mencionar algún trabajo más orientado a caracterizar la respuesta aerodinámica a vientos laterales de vehículos sobre puentes (10).

Estos últimos cuatro trabajos son muy relevantes y se verán con más detenimiento en los siguientes apartados.

2.2.2.- MEDIDAS ESPECÍFICAS EMPLEADAS.

A día de hoy, se puede decir que los proyectos van encaminados hacia tres vías principales de estudio, las tres con el claro objetivo de paliar los efectos del viento lateral:

- Sistemas de advertencia rápidos: Limitación de la velocidad de operación del tren cuando la velocidad del viento supere unos límites establecidos.
- El diseño de las infraestructuras, tanto con el uso de barreras o parapetos laterales que alteren el flujo normal del viento y consigan que éste afecte en menor medida a la composición en circulación, como con variaciones en las propias instalaciones.
- El diseño más aerodinámico de la forma exterior del tren para contrarrestar los efectos del viento transversal.

A continuación, en los siguientes apartados se detallan aquellas publicaciones que se pueden clasificar en alguno de estos tres campos, para facilitar la clasificación de soluciones.

2.2.3.- SISTEMAS DE ADVERTENCIA RÁPIDOS.

Es uno de los desarrollos que ha tenido mayor aceptación, tanto a nivel internacional como nacional. La gran mayoría llevan generalmente asociados la siguiente serie de pasos:

- La identificación de las curvas de viento características, que describen la velocidad del viento máxima permitida como una función de la velocidad de tren y las condiciones de marcha.
- El análisis de las vías asignadas para determinar la velocidad de viento local permitida para que marche el vehículo en cada punto de la vía, que dará como resultado la curva de operaciones posibles.
- La definición de frecuencia de acontecimiento del viento, basadas en investigaciones meteorológicas para evaluar la frecuencia de vientos fuertes en cada punto sobre la vía.

- La frecuencia acumulada de las ocasiones en que se exceden los valores de las curvas características de viento, es decir, la suma de las ocasiones en las que la velocidad del viento local excede los valores del viento característico sobre la longitud total de la vía.

Desarrollos a nivel internacional.

La DB y la SNCF han dirigido sendos proyectos entre el 2000 y el 2003 basados en sus trenes de alta velocidad, ICE y TGV respectivamente. Ambos están orientados a la medida de velocidades de viento en vía, y al pronóstico a corto plazo de las velocidades de viento de ráfaga. El proyecto de la SNCF fue mucho menos ambicioso que el de la DB, y sus resultados (11) fueron mucho menos documentados.

En cambio el método completo para evaluar la seguridad de trenes usado por la DB (12) constituye un importante trabajo de simulación y de análisis de este tipo de medidas correctoras.

Un punto particular de interés es que la DB usa en este proyecto un modelo dinámico del sistema de vehículo en un ambiente de viento específico para predecir el historial en el tiempo de fuerzas y momentos sobre el tren, y también usa una variedad de criterios de accidente diferentes:

- Descarga del 90 % en rueda basado en el momento de giro calculado respecto al carril de sotavento.
- Medida del desplazamiento (basado en la fuerza lateral).
- Y rueda que remonta sobre la cabeza del rail (basado en la fuerza lateral y el momento de giro en el rail de sotavento).

Existe una clara necesidad de investigar la aplicabilidad de todos estos criterios para los diferentes trenes, y en diferentes tipos de vías.

En Japón se han realizado trabajos sobre modelos a escala real que han permitido medir fuerzas y momentos sobre el tren, tanto en viaducto como en terraplén. Esto se ha complementado con una serie de pruebas atmosféricas en túnel aerodinámico de capas límite sobre la misma geometría.

Estos experimentos son bastante similares a los realizados por la Network Rail (gestora de infraestructuras inglesa) en Eskmeals (importante zona de

ensayos perteneciente a la WCML, West Coast Main Line), aunque para vehículos y configuraciones de vía diferentes.

Ambos tienen el objetivo de establecer métodos robustos para determinar los coeficientes aerodinámicos de los trenes con viento natural, para así establecer disposiciones de anemómetro óptimas que sirvan para un sistema de regulación de trenes cuando circulan con vientos transversales fuertes.

Desarrollos a nivel nacional

A nivel nacional hay dos importantes proyectos, ambos encargados por ADIF (Administrador De Infraestructuras Ferroviarias), que se han llevado a cabo y de los que incluso los medios de comunicación se han hecho eco.

El primero de ellos (13) se basa en la instalación de un sistema de protección del tráfico ferroviario frente al viento lateral en el tramo Madrid- Lleida de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-frontera francesa.

Esta línea resulta particularmente afectada por el viento lateral, en especial este tramo. Estudios meteorológicos (14) indican que uno de los fenómenos meteorológicos que se da con más frecuencia en este tramo es el viento dominante del Noroeste, del que se han llegado a registrarse ráfagas de hasta 150km/h.

Este proyecto ha sido desarrollado por la Dirección de Innovación Tecnológica de ADIF, con un presupuesto de casi dos millones de euros, lo que da una idea de la importancia que tiene para el gestor de infraestructuras español este tema.

Este sistema de protección desarrollado permitirá adecuar la velocidad de los trenes a las condiciones de viento que existan en cada momento, porque como ya se ha explicado, a medida que la velocidad del tren aumenta, el efecto del viento lateral sobre él es más peligroso, de forma que aumenta el riesgo de vuelco.

Para el funcionamiento de este sistema de seguridad es necesaria la instalación de estaciones meteorológicas que sirvan de fuentes de datos en tiempo real de la dirección e intensidad de los vientos reinantes a lo largo de todo el trazado.

En total, se han instalado 27 estaciones meteorológicas, separadas entre ellas por una distancia media aproximada de entre 15 y 20 kilómetros.

Esta red de estaciones permite disponer de información suficiente para que se pueda extrapolar con precisión el valor del viento en toda la línea con una predicción a diez minutos. Asimismo esta información, junto a parámetros como la presión atmosférica y la temperatura, posibilita la elaboración de estudios de rachas.

A partir de estudios orográficos y climatológicos, se han definido el número, características y ubicación definitiva de las estaciones meteorológicas, con todos los dispositivos y la infraestructura asociada necesaria, así como las soluciones constructivas óptimas.

La localización de estas instalaciones se ha dispuesto de tal manera que cada estación sea representativa de una determinada zona de influencia, partiendo de las peculiaridades orográficas en un entorno de varios kilómetros a ambos lados de la línea férrea.

La secuencia de funcionamiento del sistema de protección permite considerar, en el momento en que una estación prevea, mediante cálculos matemáticos, que existe riesgo de producirse viento lateral que pueda resultar peligroso para la circulación ferroviaria, se produzca la emisión de una señal de alarma al Centro de Regulación y Control de Tráfico de ADIF.

Esta señal se interpretará como una limitación temporal de velocidad en la zona en la que se prevé que exista fuerte viento lateral. La velocidad límite que se establecerá para cada tren será variable, en función del tipo de alarma, y se hará en función de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad europeas.

De esta manera ADIF ha desarrollado un nuevo sistema de predicción del viento lateral con el objeto de optimizar la explotación de la línea. Este nuevo mecanismo está adecuado a las necesidades de una línea de alta velocidad.

El otro proyecto está en vías de desarrollo por parte de un grupo de investigación de la Universidad de Málaga (UMA) junto con las empresas ELIOP y nuevamente ADIF como contratante y parte del grupo de investigación.

El trabajo que realiza el grupo de Ingeniería de Sistemas Integrados (ISIS) de la ETS de Telecomunicación de la UMA ha sido bautizado con el nombre de

'Proyecto Eolo'. El sistema de seguridad se instalará de forma experimental en torno a la vía del AVE Córdoba-Málaga, donde se pondrá a prueba la fiabilidad del método.

De momento los resultados son muy positivos ya que las técnicas de predicción que están aplicando dan como resultados errores muy pequeños.

El objetivo del proyecto es predecir cuándo la intensidad y la dirección del viento respecto al tren rebasarán los límites de seguridad. La clave está en realizar el pronóstico con la suficiente antelación para que el maquinista pueda obrar en consecuencia.

No se trata, por tanto, de medir con exactitud la velocidad del viento, sino de saber si se superarán los niveles que alertan de situaciones peligrosas. Para ello, se colocarán, al igual que en el proyecto anterior, en las proximidades del tendido férreo unos sensores que medirán la intensidad y dirección del viento.

Cada uno de estos anemómetros, distanciados entre ellos unos 20 ó 30 kilómetros, recogerá datos de intensidad y dirección del viento dos veces por segundo. A partir de esta información se elaborarán 'series históricas' con las que se podrá predecir cada minuto la intensidad y dirección del viento diez minutos después.

2.3.4.- DISEÑO DE INFRAESTRUCTURAS.

Como ya se ha citado, un camino para disminuir las cargas aerodinámicas producidas por la acción del viento lateral sobre un ferrocarril es reducir el efecto del viento usando barreras laterales o bien variando algún otro aspecto de las infraestructuras sobre las que circula el ferrocarril.

Las protecciones contra el viento tienen una gran base de estudio fundamentada en gran medida en otros campos donde su aplicación ha tenido y tiene a día de hoy gran importancia. En la agricultura, en el control de la erosión del viento, en arquitectura, en el estudio de la comodidad en el transporte y en investigaciones sobre la seguridad vial, entre otras aplicaciones.

Hay una gran cantidad de publicaciones sobre estos asuntos, tanto sobre barreras artificiales como naturales con árboles y vegetación. En el campo del estudio de la influencia del viento y la colocación de parapetos o barreras hay un importante número de publicaciones sobre ensayos y cálculos semi-analíticos de

la aerodinámica de figuras geométricas expuestas al viento y protegidas por parapetos, pero todos ellos están basados en una perspectiva más aeronáutica y en ningún caso en un ejemplo real de protección de material rodante de alta velocidad.

Es en Japón donde se presentan los primeros estudios sobre barreras laterales para aliviar el riesgo de accidente, junto con una combinación de medidas de velocidad y dirección del viento en vía. No en vano es Japón uno de los países que más sufre el problema, tanto por sus condiciones geográficas y climatológicas, como por su nivel de desarrollo de las líneas de alta velocidad (con 2.100 kilómetros cubiertos, tiene la mayor red de alta velocidad del mundo).

El 28 de diciembre de 1986 se produjo uno de los mayores accidentes causados por el viento en el Puente de Amarube en Kinosaki, Hyogo, Japón. El viento que produjo el accidente superaba los 30m/s, mientras que la seguridad del tren no recomendaba altas velocidades de circulación para vientos mayores de 25m/seg.

Pero uno de los trabajos más completos es el elaborado por la Universidad Nacional de Seúl y el instituto de investigaciones ferroviarias de Corea (4). Es un trabajo de investigación en el que se estudian mediante el uso de CFD la eficiencia de diferentes barreras de protección. Se simula una línea y un ferrocarril coreano y mediante análisis estadístico se extraen conclusiones sobre las barreras más eficaces.

Si bien es un estudio muy bien elaborado el modelo que emplea es muy sencillo, con un análisis en 2D estático y en cuanto a las barreras solo se contemplan cuatro modelos distintos y tres posibles alturas. Por tanto solo puede servir como primera aproximación a la hora de fijar una idea del tipo de barrera que puede resultar más eficaz.

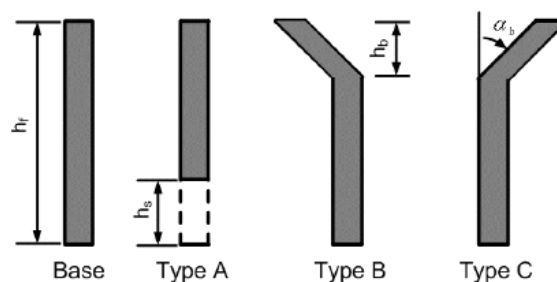


Imagen 2.2: Barreras laterales estudiadas por la Universidad de Corea.

Es también muy útil porque las simplificaciones que toma están documentadas, y es un excelente punto de partida para el desarrollo de proyectos más complejos como el que nos incumbe. Se pueden resumir todas las conclusiones obtenidas en cinco:

- a) Para las barreras de menos de 1m, las fuerzas aerodinámicas se reducen notablemente. De 1m a 2,5m, son muy sensibles a la altura de la barrera, y se reducen conforme crece esta. Para más de 2,5m hay poca variación con respecto al crecimiento de la altura.
- b) Las líneas de flujo se alejan del tren con barreras inclinadas en su extremo hacia afuera.
- c) Conforme crece la altura de la barrera, la sustentación y el momento de balanceo tienden a mejorar, pero el empuje lateral cambia de dirección cuando la altura crece por encima de los 2m.
- d) En muchos casos, el dejar un hueco inferior tiene efectos negativos en las fuerzas aerodinámicas, pero esto requiere un análisis más detallado porque cancela los efectos inducidos de las barreras laterales y produce menores costes de construcción.

Otro proyecto del 2003 (16) obtuvo la estructura del flujo alrededor de barreras laterales con distintos ángulos de inclinación con respecto al terreno y superficies lisas y rugosas. Se obtuvo que las barreras menos efectivas son las rugosas, que en barreras de la misma longitud las verticales son más efectivas que las inclinadas mientras que son las inclinadas más efectivas que las verticales para la misma altura de barrera.

En este mismo estudio se determinó por métodos computacionales y se contrastó por ensayos en túnel de viento, el efecto del viento cruzado en el momento de balanceo para diferentes ángulos de inclinación de la vía, siendo esta inclinación la solución para disminuir dicho momento teniendo en cuenta los vientos dominantes de la zona.

En una publicación, que se puede considerar complementaria a esta última, se aborda el estudio por métodos numéricos de la influencia del viento lateral sobre una cabeza tractora que se desplaza sobre un puente (17); en este trabajo se concluye que el momento de balanceo es menor cuando la cabeza tractora se desplaza por la línea de sotavento y que la influencia de las barreras del puente

es importante y también es menos efectiva, cuando el vehículo se desplaza por el carril de barlovento.

La siguiente publicación relevante (15) en este campo de las barreras laterales, es una tesis del profesor Barcala Montejano de la ETSI Aeronáuticos de la UPM.

Estudia trenes desplazándose por viaductos y por terraplenes. En esta tesis han sido experimentalmente analizadas las características aerodinámicas, fuerza lateral y momento de balanceo, de un tren RENFE de alta velocidad española (AVE).

El interés principal fue el de evaluar las características de protección de diferentes tipos de parapetos y determinar su comportamiento dentro de ciertos límites de tamaños y formas. Emplea también como viene siendo habitual en estos estudios modelos bidimensionales y estáticos.

Han sido medidos en túnel aerodinámico los efectos en la fuerza lateral y en el momento de balanceo del tren con diferentes tipos de barreras cuando el vehículo está situado sobre un puente y cuando está situado sobre el terreno firme. Estos ensayos se han complementado con ensayos en túneles de visualización.

Estas son las conclusiones más importantes que recoge el profesor Barcala en esta tesis, y que se tendrán muy en cuenta a la hora de desarrollar el proyecto que nos ocupa:

- Los resultados experimentales se han realizado con parapetos porosos, con parapetos de álabes y con parapetos sólidos equipados con aleros, y obviamente cualquiera que sea el tipo de parapetos ensayados su efectividad aumenta a la vez que se reducen las cargas aerodinámicas sobre el tren al aumentar su altura, independientemente de que el tren esté situado sobre un viaducto o sobre terreno firme y la situación en la vía, a barlovento o a sotavento de la infraestructura.
- No obstante se ha comprobado que la variación de las cargas aerodinámicas reducidas es pequeña con la altura adimensional a partir de 0.7 veces la altura del tren (RENFE S-100).

- Las barreras porosas homogenizan el flujo del viento corriente abajo aunque no disminuyen los coeficientes aerodinámicos más de un 20% respecto a la configuración sin ellas.
- Los parapetos con álabes ensayados no han disminuido el coeficiente de resistencia apreciablemente, y sí han disminuido el coeficiente de momento a partir de una altura de 0.6 veces la del tren. Esto se explica al tener en cuenta que los álabes deflecan la corriente por encima del modelo del tren y elevan el punto de remanso en la sección de estudio del modelo, comportándose entonces de forma similar al tren protegido por parapetos opacos.
- Los resultados experimentales con parapetos sólidos equipados con aleros muestran que la adición de aleros a los parapetos aumenta la protección efectiva de las barreras. Con el vagón del tren situado en la vía de barlovento sobre el viaducto los coeficientes aerodinámicos del ferrocarril sometido a vientos laterales disminuyen drásticamente cuando el parapeto opaco es equipado con alero. El mismo fenómeno ha sido observado cuando el vehículo está situado en la vía de barlovento sobre el terreno; sin embargo, en este caso el efecto de protección de los parapetos es menor que en el viaducto.
- Cuando el vagón del tren está situado sobre la vía de sotavento los coeficientes aerodinámicos decrecen casi linealmente con la altura del parapeto y la efectividad de la protección también. Este decrecimiento es mayor en el viaducto que en el terreno, aunque la variación de los coeficientes aerodinámicos no tienen apenas modificación con la variación del ángulo de asiento del parapeto y de la longitud reducida del alero.

Según las conclusiones de esta tesis, el grado de peligrosidad de la influencia del momento de balanceo producido por el viento lateral aumenta cuando el vehículo se desplaza por un puente, ya que la velocidad en la capa límite atmosférica crece al aumentar la altura al terreno, dejando a un lado el hecho que a nivel del terreno hay innumerables elementos que pueden disminuir el efecto del viento, la vegetación entre otros.

Los resultados muestran que, como cabía esperar, las cargas aerodinámicas disminuyen al aumentar el tamaño de los sistemas de protección frente al viento, y que las barreras sólidas parecen más efectivas sobre los puentes que sobre el terreno. Esto se debe a que cuando el ensayo se realiza

sobre el terreno el nivel del suelo es una línea de corriente, se produce un punto de remanso en la base del parapeto de barlovento y entonces la zona de alta presión cercana al punto de remanso perturba la corriente incidente, haciendo que la corriente se desvíe suavemente aguas arriba del parapeto. Sin embargo, si el ensayo se realiza sobre el viaducto el punto de remanso delantero de mueve libremente a lo largo de la superficie de barlovento del puente.

Existen otras publicaciones con ensayos en túneles aerodinámicos (7 y 8) donde se hace un estudio con diferentes formas y geometría de los puentes, diferentes terraplenes a diferentes alturas del suelo, además de diferentes formas del tren/vehículo, dejando abierto el estudio de la turbulencia natural, el efecto de la capa límite terrestre y como se decía anteriormente la introducción de modelos no estacionarios.

Todas estas consideraciones serán tenidas en cuenta a la hora de enfrentarse al planteamiento del proyecto que nos ocupa.

Otros desarrollos especiales hacia líneas aún poco exploradas se han llevado acabo o se están llevando acabo en Japón. Se están realizando proyectos que permitan una visión general de los accidentes ocasionados por el viento mediante pruebas del túnel del viento en trenes sobre viaductos y terraplenes.

Fueron probados diferentes tipos de trenes genéricos y se midió el efecto de diferentes grosores de viaducto sobre las fuerzas y momentos aerodinámicos. También se simularon trenes sobre terraplenes.

Finalmente se elaboró un método para deformar la forma de los terraplenes de manera que se tenga en cuenta el efecto del movimiento del vehículo. Estos son proyectos muy ambiciosos, con un coste global disparatado y que a día de hoy ni se plantean las compañías Europeas, ya que implicarían cambios profundos en la forma de diseñar y construir las infraestructuras de Líneas de Alta Velocidad.

2.3.5.- DISEÑOS DE TRENES MÁS EFICACES FRENTE AL VIENTO LATERAL.

Estos desarrollos aun no están muy implantados, ya que como se recogía anteriormente, el desarrollo aerodinámico de los trenes en los últimos años ha ido orientado hacia la reducción de la resistencia al avance, y se ha hecho poco en cuanto al diseño para la mitigación de los efectos del viento lateral.

A esto se une que es muy difícil conocer que proyectos a este respecto se están, o han sido llevados a cabo, ya que el diseño de los trenes corre a cargo de grandes empresas que rara vez dan detalles sobre el desarrollo de su trabajo, y mucho menos datos relevantes que pueden ayudar a mejores desarrollo por parte de la competencia.

La empresa española TALGO en sus catálogos publicitarios sobre el modelo 350 que conforma la serie 102 de RENFE, indica que el diseño de este tren está optimizado para hacer frente a los vientos laterales, pero no explica en que se fundamenta esta optimización, ni si se refieren a la forma peculiar de la cabeza tractora o a los vagones. A lo largo de este proyecto aparecerá la oportunidad de validar o no estas afirmaciones.



Imagen 2.3: Frontal del TALGO 350 o AVE S-102. Fuente: Ministerio de Fomento.

En 2003 se ha publicado un trabajo dedicado a las características aerodinámicas de un tren bajo la acción del viento lateral en puentes y terraplenes (7) en el que se concluye que la fuerza lateral aerodinámica varía con la forma del contorno del techo del vehículo. Además también citaba que en el caso de vehículos sobre puentes, el coeficiente de la fuerza lateral aerodinámica del vehículo aumenta al decrecer el espesor del canto del puente. Pero esto último ya ha sido mencionado en el anterior apartado.

2.3.- PROYECTOS PILOTO EN DESARROLLO.

Proyectos en desarrollo relacionados con el problema de los vientos laterales hay muchos, pero por su estado de desarrollo incipiente o por la poca información que se publica de ellos es muy difícil clasificarlos en un grupo u otro, ya que o bien no se conocen aún sus objetivos o bien no se han publicado unos resultados concretos.

En este apartado se comentarán algunos y la información que a día de hoy se dispone de ellos, más con una idea de ilustrar al lector sobre la diversidad de proyectos que con la de obtener alguna conclusión relevante de cara al desarrollo de este proyecto.

BOMBARDIER en Suecia está realizando un proyecto basado principalmente en los cálculos con CFD del flujo alrededor y fuerzas sobre el ICE-2 de la DB. Por lo que se conoce emplean diferentes tipos de modelos RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations).

Este minucioso trabajo investiga el efecto de usar códigos diferentes, mallas de densidades diferentes, etc., y destaca algunas dificultades al realizar estos cálculos. Además realiza algunas comparaciones con datos de túnel de viento para el ICE-2 y también algunos datos de medida de baja turbulencia en el túnel aerodinámico.



Imagen 2.4: ICE 2 de la DB. Fuente DB.

Hay también un trabajo en ejecución en los EE.UU. y Hong Kong para observar el efecto de vientos transversales fuertes en vehículos sobre puentes, que consideran los efectos de la dinámica de vehículo, el movimiento del puente y

la interacción entre el movimiento inducido del puente por el viento y el vehículo en sí mismo. Estos proyectos están principalmente basados en los cálculos dinámicos de comportamiento del vehículo, pero los métodos usados podrían ser relevantes en el cálculo del comportamiento del tren frente a fuertes vientos laterales.

Un trabajo parecido se está llevando a cabo por la RTRI (Railway Technical Research Institute o Instituto de Investigación Técnica Ferroviaria) en Japón para predecir el desplazamiento del ferrocarril con vientos fuertes. Parte de los esfuerzos sobre la vía para investigar la estabilidad total del vehículo bajo la acción de vientos fuertes. Estos cálculos están siendo realizados usando un modelo de efectos dinámicos sobre el tren, y están apunto de ser publicados.

A nivel nacional hay un trabajo muy importante que se está llevando acabo actualmente por distintos organismos que tienen divididas sus tareas. Así, es tarea de ADIF, TALGO, CAF y SENER la definición de requisitos relacionados con la infraestructura ferroviaria y con el material rodante, en la Universidad Politécnica de Madrid (Instituto Universitario “Ignacio Da Riva”, IDR/UPM) recae la responsabilidad de coordinación del proyecto, así como la ejecución de los ensayos en túnel aerodinámico relativos tanto a infraestructuras como material rodante y las medidas en campo, y en el grupo de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la misma Universidad la del análisis de fenómenos aeroelásticos en las infraestructuras. Por su parte el Centro de Estudios e Investigaciones Técnica de Guipuzcoa es responsable del estudio de la dinámica del vehículo y su estabilidad, y la Fundación Caminos de Hierro del análisis de combinaciones de cargas y calidad de la marcha.

El objetivo principal del proyecto es evaluar los efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios para la determinación de valores límite de operación de los trenes de alta velocidad.

La finalidad última es la confección de un manual con la información generada sobre sistemas de protección pasiva, impacto en la catenaria, la información relativa a inestabilidades aeroelásticas, y los resultados sobre la dinámica del tren y la combinación de la acción del viento con otras acciones ferroviarias, y para alcanzar este objetivo general, las distintas facetas que se contemplan son:

- Medida experimental mediante ensayos en túnel aerodinámico con modelos bidimensionales a escala de las distribuciones de presión sobre vehículos ferroviarios sometidos a viento lateral en un amplio rango de entornos, a fin de determinar las acciones del viento sobre los mismos.
- Estudio experimental en túnel aerodinámico de la eficacia de diversos tipos de barreras cortavientos, así como el impacto de las mismas en la excitación de inestabilidades aeroelásticas en la catenaria. Estudio de las cargas del viento sobre las barreras y las infraestructuras de las vías.
- Medidas en campo de las características del viento lateral en el entorno de diversos tipos de la plataforma ferroviaria, a fin de cuantificar en qué medida las diferentes formas de la plataforma afectan al perfil de velocidades del viento lateral en relación con el existente sobre terreno llano.
- Estudio de la acción del viento sobre las estructuras y elementos asociados al ferrocarril (viaductos, pórticos, catenaria, báculos...), y estudio de las vibraciones producidas por el viento sobre estas estructuras.
- Análisis del efecto del viento sobre la dinámica del vehículo, especialmente la incidencia de éste en un posible vuelco y su efecto sobre la estabilidad de marcha.
- Análisis de las combinaciones de la acción lateral del viento con otras acciones ferroviarias, incluido el cálculo de las variables fundamentales a tener en cuenta en el análisis de la seguridad de marcha (riesgo de descarrilamiento y vuelco, y riesgo de ripado de vía) y de la calidad de marcha (aceleración y variación de la aceleración lateral no compensada, velocidad de giro de balanceo).

También recoge este proyecto que el análisis del fenómeno supone caracterizar y modelizar adecuadamente la respuesta del vehículo en función de la dirección e intensidad del viento, así como caracterizar el vehículo (gálibo, suspensión, estado de conservación, velocidad de circulación, masas suspendidas y no suspendidas), la vía (ancho, calidad), el pantógrafo y la catenaria.

Los resultados del análisis deberán someterse a experimentación, pero como ya se ha dicho este es un proyecto en desarrollo del que aún no se

disponen resultados ni se han redactado publicaciones, salvo la convocatoria por parte de las instituciones que lo requieren, que es lo que se ha podido recoger en este trabajo.

2.4.- NORMATIVA VIGENTE.

En este apartado se recogen las normas y legislaciones vigentes en la Unión Europea, que tienen relación con el proyecto que se plantea, o bien porque proporcionan indicaciones para la determinación de algunas variables, o bien porque se deben cumplir algunas de sus directrices técnicas durante el desarrollo del proyecto.

A continuación se presenta un listado con las normas y especificaciones técnicas empleadas y posteriormente un pequeño resumen de cada una de ellas que permite la justificación de su uso en este proyecto.

- UNE-EN 1991-1-4
- UNE-EN 50125-1
- UNE-EN 50125-2
- UNE-EN 50125-3
- Legislación europea. Directiva 2004/50/CE

UNE- EN 1991-1-4: Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.

La Norma Europea UNE-EN 1991-1-4 (25) proporciona indicaciones para la determinación de las acciones naturales del viento para el diseño estructural en las obras de edificación e ingeniería civil en cada una de las áreas cargadas.

Esto incluye tanto la estructura completa como partes de ella o elementos unidos a ella, como por ejemplo, componentes, revestimientos y sus anclajes, barreras de seguridad o pantallas antirruído, grupo este donde entrarían las barreras para-viento.

Esta parte se aplica a:

- Obras de edificación e ingeniería civil con alturas inferiores a los 200m.
- Puentes con luces no superiores a 200m, siempre y cuando se satisfagan los criterios especificados de respuesta dinámica.

El objeto de esta parte es predecir las acciones características debidas al viento en estructuras apoyadas sobre el suelo así como en sus componentes y accesorios adicionales.

UNE-EN 50125-1: Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo. Parte 1: Equipos a bordo del material rodante.

Esta norma (26) trata de definir las condiciones ambientales en Europa. El dominio de aplicación de esta norma cubre la utilización de equipos eléctricos, electromecánicos y electrónicos del material rodante, para los parámetros siguientes: altitud, temperatura, humedad, movimiento del aire, lluvia, nieve y granizo, hielo, radiación solar, rayo, contaminación, vibraciones y choques, interferencias electromagnéticas, ruido acústico, y características de los sistemas de alimentación.

La norma define en particular:

- Las condiciones de interfaz entre el vehículo y su entorno ambiental;
- Las reglas ambientales generales para el equipo a bordo del material rodante, especialmente para los subsistemas principales.

Las condiciones ambientales que se definen se consideran las normales en servicio; ocasionalmente podrán especificarse condiciones más rigurosas. Los microclimas que rodean los componentes pueden estar definidos en las correspondientes normas de productos apropiadas o por medio de requisitos especiales.

UNE-EN 50125-2: Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo. Parte 2: Instalaciones eléctricas fijas.

Esta norma europea (27) tiene en cuenta, al igual que la anterior, las condiciones ambientales existentes en Europa. Trata de las influencias ambientales sobre las instalaciones eléctricas fijas para alimentación eléctrica de tracción y sobre los equipos esenciales para el funcionamiento del ferrocarril, al aire libre, en zonas cubiertas, en túneles, y dentro de recintos situados en las zonas anteriores.

Entre las influencias se incluyen: altitud, temperatura y humedad, corrientes de aire, lluvia, nieve, granizo, hielo, arena, radiación solar, rayos, contaminación, vibraciones, impactos y CEM.

Directiva 2004/50/CE. Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad.

Directiva europea (24) que tiene como objetivo realizar las acciones que puedan resultar necesarias para garantizar la interoperabilidad de las redes, especialmente en el ámbito de la armonización de las normas técnicas de los diferentes países europeos.

Esta especificación técnica de interoperabilidad (en adelante ETI) está enfocada a tres subsistemas principales:

- Subsistema material rodante de alta velocidad.
- Subsistema explotación y gestión del tráfico.
- Subsistema Infraestructura del sistema ferroviario.

En lo referente a este proyecto, se tendrá muy en cuenta la ETI referente al subsistema material rodante. En concreto las especificaciones funcionales y técnicas relativas a las condiciones ambientales, en particular las referentes a la circulación con viento cruzado.

Esta ETI establece una serie de requisitos para evaluar la conformidad del material rodante a través de tablas y curvas eólicas características que establecen los valores límite de circulación para diferentes velocidades de viento cruzado.

Además el anexo G de esta norma define los criterios de evaluación de la estabilidad frente a los vientos cruzados de trenes para orientar los trabajos que se realicen a este respecto en túnel de viento.

2.5.- CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.

La seguridad del tráfico ferroviario en condiciones extremas de viento lateral hace necesaria, según un estudio de una eminencia en este campo, D. Gerd Matschke, una normativa europea reguladora común y un único tipo de homologación de los vehículos, que todavía no se ha iniciado.

Según esta propuesta, la normativa debería cumplir una serie de necesidades que son enumeradas a continuación de forma concisa:

En este estudio, el comportamiento de los vehículos ferroviarios en condiciones de viento lateral vendría determinado por las propiedades de los

coches y vagones, por la configuración, el peso, la situación del centro de gravedad y las propiedades de los órganos de rodadura; el trazado de la vía en cuanto a su radio, peralte, asiento y calidad de la geometría y las condiciones meteorológicas, en especial la frecuencia de aparición de un viento fuerte.

Es decir que no es posible plantearse crear un análisis tipo y que valga para todo tipo de trenes, sino que hay que centrarse en un determinado tipo de tren que circule sobre una determinada línea y sacar conclusiones que regulen a este vehículo frente a alarmas de viento lateral, o dotar a la infraestructura de medidas que garanticen la seguridad del servicio, sobre todo si se trata de trenes de alta velocidad.

Los análisis de peligrosidad del viento de costado para el tráfico ferroviario se deben realizar con métodos probabilísticos, al no ser posible su estudio in situ, ya que tendrían que coincidir temporal y localmente un viento de una cierta intensidad y vehículos ligeros.

Los estudios se deben realizar mediante el cálculo de las reacciones del vehículo frente al viento lateral extremo, la comparación con un tráfico de referencia y la deducción de medidas a tomar.

Por la misma línea que este estudio de Matschke se ha pronunciado la Rail Safety and Standard Board en una publicación reciente (16). En ella se recogen cuales son los puntos clave sobre los que se dirigen y deben dirigirse todos los trabajos de investigación relacionados con la influencia del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad:

- a) Averiguar el modo más rentable de cuantificar los coeficientes aerodinámicos de un tren.
- b) Investigar el efecto de varios parámetros (en particular el diseño del tren, características de viento, y características del terreno) sobre la magnitud de los coeficientes aerodinámicos.
- c) Cuantificar los coeficientes de momento rodantes que actúan sobre un tren que circula sobre un terraplén o viaducto.
- d) Empezar una revisión del viento en una ruta típica incluyendo la contribución de ráfaga debido a la turbulencia de dicho viento.
- e) Evaluar el efecto de las características de las ráfagas de viento sobre las cargas aerodinámica de un tren.

- f) Evaluar el efecto de la dinámica de suspensión del tren sobre las cargas inducidas aerodinámicamente.
- g) Investigar los rasgos de diseño, y la mitigación ofrecida por, las vallas de viento, sistemas de alerta de viento en vía, sistemas de advertencia de viento rápidos, modificaciones en el tren, y medidas operacionales.
- h) Evaluar la viabilidad de medir momentos rodantes y viento sobre un tren de servicio.

Muchos de estos puntos, como se vio en el anterior apartado, se están trabajando, pero si es cierto que la RSSB señala que hay cuatro puntos sobre los que todavía no se ha trabajado o se requiere un mayor esfuerzo, y son a los que encamina a lo ingenieros e investigadores, los puntos (c), (f), (g) y (h) de arriba.

A la vista de las publicaciones antes descritas, y de las recomendaciones de la RSSB, se puede concluir que existe una necesidad de aumentar el conocimiento en los campos en los que se va a centrar dicho proyecto, y que seguidamente se destacan de forma breve:

- Estudio de la afectación frente a vientos laterales de una determinada infraestructura perteneciente al territorio español así como de los trenes de alta velocidad RENFE que efectúan servicios en ella.
- Propuestas de medidas de mitigación específicas para el entorno escogido.
- Comparación de los valores obtenidos con los establecidos en la correspondiente Especificación Técnica de Interoperabilidad europea.
- Evaluación y análisis de las medidas propuestas.

No se han encontrado en la literatura un análisis completo sobre la combinación de diferentes trenes RENFE, sometidos a viento cruzado, variando las condiciones de vía, simulando viaducto y terreno firme y contemplando soluciones de mitigación diferentes en forma de barreras laterales y estudio de la forma del tren.

Además como se indicó antes, se hace necesario focalizar el estudio sobre una determinada vía en la que se tenga constancia de que existe el problema y no existan, o no sean suficientes, las medidas de mitigación.

Por eso este proyecto buscará centrarse en un determinado tramo conflictivo, aunque sus resultados podrán ser extrapolables a otras vías que compartan los parámetros de las estudiadas.

Este será el objeto de este proyecto que pretende cubrir en parte algunas de las necesidades señaladas por la RSSB, y que se estima debería recoger la futura normativa europea antes comentada. Además pretende este trabajo llegar un poco más allá definiendo si las soluciones propuestas son viables, no solo desde un punto de vista técnico sino también económico.

3. MODELADO DE LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA EXPLOTACIÓN FERROVIARIA.

CAPÍTULO 3: MODELADO DE LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA EXPLOTACIÓN FERROVIARIA.

3.1.- IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ACTUACIÓN.

Obviamente no todas las líneas, ni todos los ferrocarriles se ven afectados de igual manera por los efectos del viento lateral. Este apartado pretende identificar el tipo de explotaciones ferroviarias que se ven perturbadas, para poder establecer su problemática y estudiar los factores que las caracterizan.

Dentro de estos factores no solo se hará referencia a aquellos que incumben al material rodante o a las infraestructuras, es también necesario estudiar la climatología de la zona objeto de estudio para definir las características meteorológicas más relevantes, su origen, y sus principales variables y valores característicos.

A partir de este estado del conocimiento climático y técnico de la zona problemática se podrá iniciar un estudio de las medidas más eficaces para cada punto en función de todas sus condiciones y parámetros.

3.1.1.- EXPLOTACIONES FERROVIARIAS AFECTADAS.

En ocasiones, la operación de líneas ferroviarias puede verse afectada por la incidencia de fenómenos meteorológicos adversos que afectan de manera importante a la circulación de los trenes.

De todos estos fenómenos, es sin duda el viento lateral, el más peligroso debido a que la estabilidad del tren disminuye a medida que el viento provoca pares próximos, o superiores, al par de vuelco de los trenes.

Este efecto se acrecienta con la velocidad del tren como se puede observar en la siguiente figura, a medida que aumenta la velocidad del viento incidente, menor es la velocidad segura de circulación del tren.

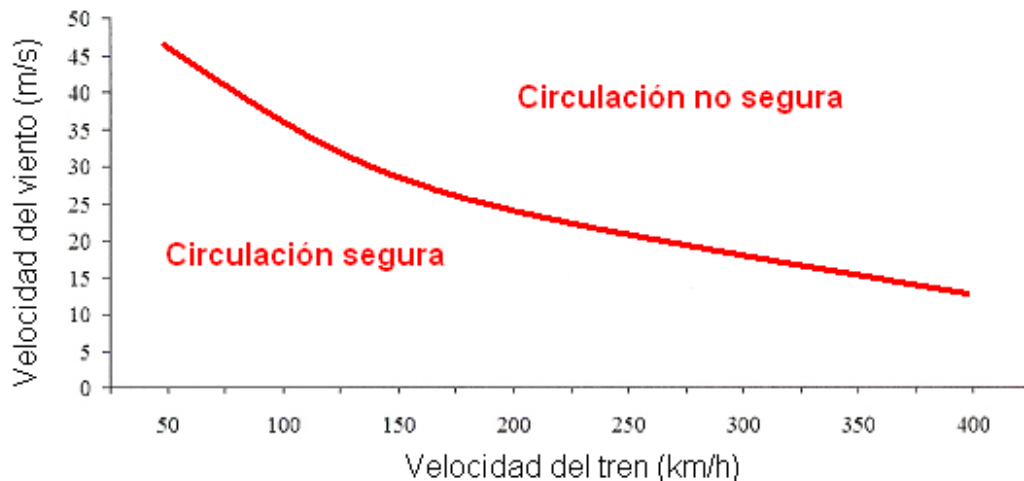


Imagen 3.1: Curva característica de viento aproximada de los trenes de alta velocidad. Elaboración propia.

Esta curva es lo que se conoce como CWC (Characteristic Wind Curve o curva característica del viento) y marca la velocidad a la que puede circular el tren frente al viento incidente de forma lateral. Es específica de cada tren y se determina mediante ensayos experimentales y cálculos analíticos. Para su determinación se considera una descarga de un 90% en las ruedas de barlovento del bogie.

En el caso de trenes de alta velocidad, el problema debe ser considerado con mayor detalle, sobre todo cuando la velocidad de circulación supere los 250km/h y la del viento los 15-20m/s dependiendo de la configuración de la vía.

Este proyecto pretende centrarse exclusivamente en el territorio nacional, por lo que solo se tendrán en cuenta para el estudio aquellas líneas de alta velocidad que se encuentren en España y que por la climatología de la zona se ven afectadas habitualmente por vientos laterales que impidan que el servicio se preste con total normalidad.

Una Línea de alta velocidad o LAV es una infraestructura para el transporte público sobre raíles a velocidades superiores a los 200-220km/h. La UIC apoya el texto de la Unión Europea sobre alta velocidad, en el que se especifica que cualquier línea apta para 200km/h o más, sea de nueva construcción o actualizada, es una línea de alta velocidad

En la siguiente figura aparecen dibujadas en verde las líneas de alta velocidad existentes actualmente en España para uso comercial.



Imagen 3.2: Estado de la alta velocidad ferroviaria en España. Ministerio de Fomento.

Según se ha venido publicando en los medios de comunicación, y como se recogía en el estado del arte y en la introducción, el gestor de infraestructuras ferroviarias (ADIF) está poniendo especial atención e iniciando proyectos para la mitigación de los efectos de las fuerzas laterales en el tramo Madrid-Lérida de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-frontera francesa y en torno a la vía del AVE Córdoba-Málaga, con la finalidad de aumentar la seguridad en estas líneas del tren de alta velocidad.

Pero sin duda a día de hoy, la línea más afectada por los fenómenos climatológicos adversos producidos por los vientos es la línea Madrid- Barcelona-frontera francesa, sobre todo el tramo que transcurre en el valle del Ebro, es decir, básicamente el tramo que atraviesa la provincia de Zaragoza.

Es por eso que este proyecto se centrará en las características de este trazado para definir soluciones específicas para la línea. Antes de pasar a definir las características climatológicas de la zona se definirá el material rodante que circula por la línea objeto del proyecto y que será por tanto el que se someterá a estudio.

Por la línea Madrid- Barcelona actualmente circulan de manera habitual (en ocasiones especiales RENFE varía sus servicios para dar más o menos

cobertura) trenes de los llamados de segunda generación. En España estos trenes son el RENFE serie 102 y el serie 103.

Los trenes de segunda generación son aquellos que se han desarrollado desde los años noventa hasta ahora, y que han comenzado a operar en servicio regular a finales de la década pasada y en lo que llevamos de esta. Estos trenes presentan diferencias tecnológicas importantes respecto a las unidades de primera generación (como es el AVE S-100), y son capaces todos ellos de superar el límite de velocidad comercial de 300km/h, alcanzando incluso los 350km/h.

Estos 350km/h son los que alcanza el Serie 103 en explotación comercial, y es por ello que RENFE los está utilizando para dar servicio en la línea de Alta Velocidad entre Madrid y Barcelona, este tren se utilizará principalmente para realizar el recorrido directo sin paradas gracias a que su máxima velocidad le permite realizar el trayecto de 600km en 2h30m. La Serie 102 (TALGO 350), que alcanza una velocidad de 330km/h, será la que realice este trayecto parando en Guadalajara, Zaragoza, Lérida y Tarragona.

La Serie 102 es el TALGO 350, un tren aerodinámico, ligero y de bajo consumo. Es un ferrocarril de diseño convencional, es decir, la tracción reside en las cabezas tractoras, mientras que el resto de vagones no son motrices. El peso máximo por eje es de 17t (en las cabezas tractoras).

El Serie 103 es una evolución de los ICE- 3 alemanes, el ICE-350 E bautizado como Velaro E. Puesto en servicio a partir del 2000 es capaz de circular comercialmente a 350km/h. Destaca por su novedoso concepto de tracción distribuida, en la que los motores no se concentran en las cabezas tractoras, sino que van colocados a lo largo del tren, lo que unido a su ligereza le permite un peso de poco más de 16t/eje.

Serán por tanto estos dos trenes los que nos ocupen en este proyecto, y a los que en adelante se hará referencia casi siempre por su numeración RENFE, es decir Serie 102 para el TALGO 350 y Serie 103 para el Velaro E de SIEMENS. Sus características técnicas y de diseño detalladas se expondrán en el siguiente capítulo de parámetros.



Imagen 3.3: A la derecha el serie 102 y a la izquierda un serie 103. TALGO y SIEMENS.

3.1.2.- DESCRIPCIÓN Y CLIMATOLOGÍA DE LAS ZONAS AFECTADAS.

Este proyecto se centrará en la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona. Esta línea resulta particularmente afectada por el viento lateral, en especial el tramo comprendido entre Madrid- Lérida y más concretamente aquel que atraviesa el valle del Ebro, como se recoge en la referencia 14.



Imagen 3.4: En azul el trazado de la L.A.V. Madrid- Barcelona. Elaboración propia con Google Maps

En la actualidad el tramo Madrid – Lérida cuenta con un innovador sistema de medición y control del viento lateral (13), que permite adecuar la velocidad de los trenes a las condiciones de viento existentes. El sistema consta de 27 estaciones meteorológicas que sirven de fuente de datos a un autómata de control que realiza una predicción a 10 minutos vista y envía las señales correspondientes al organismo de control que es el quien decide o no regular la velocidad.

Pero estas medidas de mitigación pueden resultar insuficientes para el operador RENFE, ya que este establece un compromiso de puntualidad con sus clientes, y por lo tanto los retrasos en la circulación le pueden penalizar económicamente. Además de esto, vientos fuertes siempre suponen un problema de seguridad, como ya se expuso en capítulos anteriores.

Esta región geográfica del valle de Ebro es de sobra conocida por sus particularidades climatológicas y por los fuertes y característicos vientos que se dan en ella, siendo los más importantes el viento del Cierzo y el Bochorno.

Estos vientos se generan por la especial configuración de la cuenca del Ebro. Explicándolo de manera gráfica quiere decir que la cuenca del río actúa como embudo para los vientos atlánticos y mediterráneos que se encajonan entre los Pirineos y la Cordillera Ibérica. Es también común en el valle del río Jalón y sus valles circundantes, y afecta de manera directa al trazado de la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona.

Más técnicamente se pueden analizar las isóbaras en los mapas de superficie y se observa que generalmente cortan perpendicularmente el valle del Ebro, por lo que el Cierzo es un viento de gradiente isobárico, con normalmente 1020mb en la cabecera y 1008mb en la desembocadura lo que provoca normalmente una diferencia de presiones ($\Delta P=12\text{mb}$) y el viento resultante es de $12 \times 2 = 24$ nudos que equivale a unos 44.5km/h o 12.35m/seg.

Ya Catón el Censor (s. II a. C.) se refiere en sus crónicas a este viento Cercio de la Hispania Citerior, que era capaz de derribar a un hombre armado o carretas cargadas. En la actualidad no es extraño, incluso, que algún camión vuelque, o que haya derrumbamientos en algunos edificios.



Imagen 3.5: Dirección del viento del Cierzo.

El Bochorno, en cambio es un viento del Sureste de procedencia mediterránea, que sube aguas arriba del Ebro. Este viento se presenta con situaciones meteorológicas de altas presiones sobre Europa central y una depresión sobre el centro o sur de la Península Ibérica normalmente con débil gradiente bórico, por lo que suele ser de escasa intensidad.

Otras veces, un flujo de aire del sur, de procedencia sahariana, inducido por un anticiclón en el Mediterráneo y bajas presiones sobre España occidental, produce un viento del sureste en el valle, muy cálido y seco.



Imagen 3.6: Dirección del viento Bochorno.

En lo que a nosotros respecta de cara al proyecto que nos ocupa, se pueden simplificar ambos vientos en uno, ya que comparten dirección aunque sean de sentido opuesto. Como este proyecto se centra en vías de tren que atraviesan el valle del Ebro, con tener en cuenta la dirección de los vientos valdrá, ya que el sentido es irrelevante para este trabajo, porque los trenes circularan en ambas direcciones y los efectos sobre el tren no dependerán del sentido del viento sobre una dirección fija.

Según muestra la siguiente imagen, las rosas de los vientos, en las zonas del valle del Ebro, se encuentran deformadas y alargadas en dirección NO-SE, que es la dirección del río, mientras que el resto de direcciones corresponden a situaciones de transición de mucha menor intensidad y frecuencia.

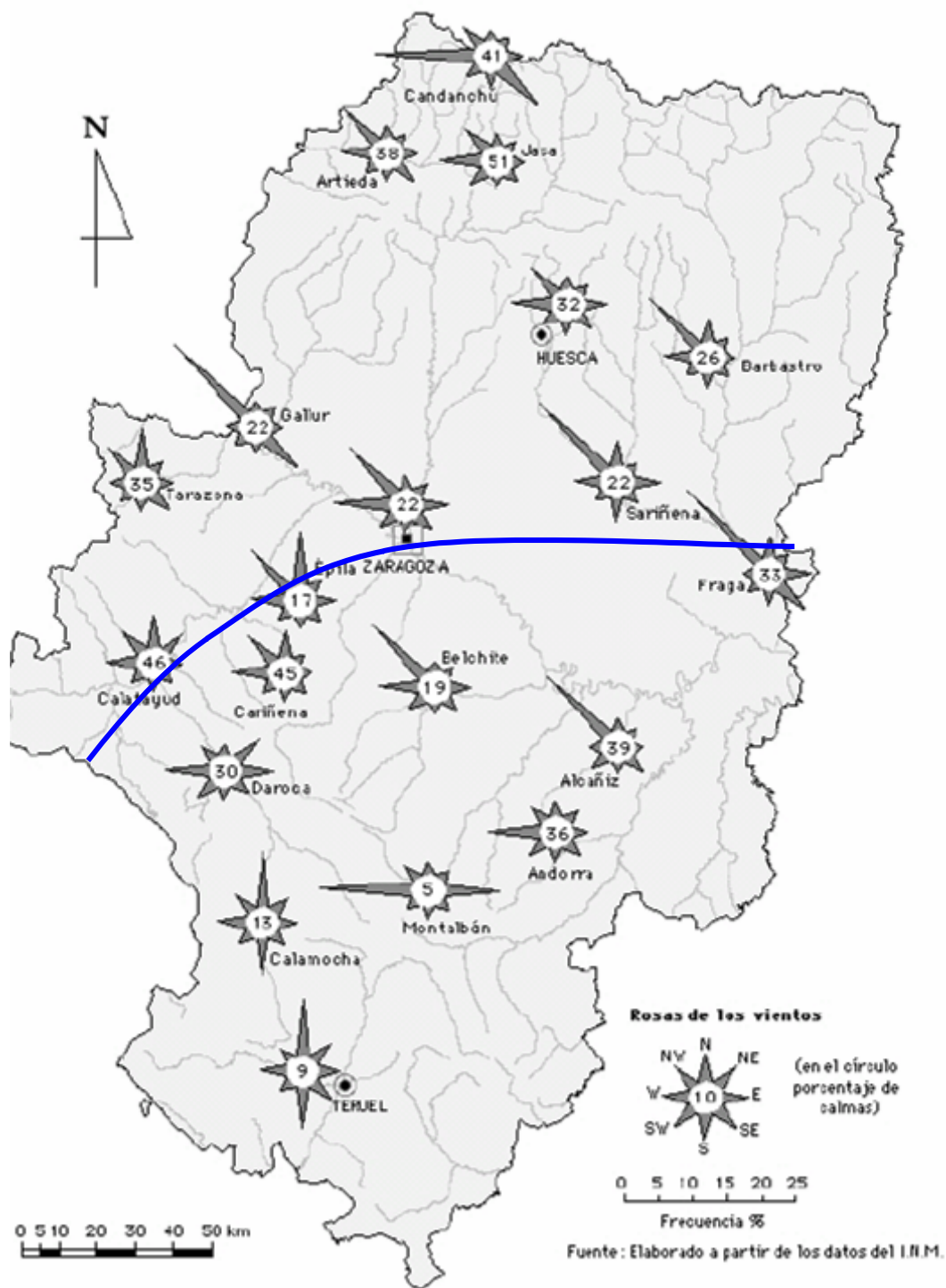


Imagen 3.7: Rosas de los vientos en Aragón, y en azul el trazado aproximado de la LAV Madrid-Barcelona a su paso por la Comunidad Autónoma. Fuente: INM.

Para este estudio que nos ocupa, de los vientos de la zona, sin duda el más importante y más problemático por sus velocidades medias es el del Cierzo, aunque a continuación se exponen algunos de los datos más relevantes de él y del otro viento predominante en el valle, el Bochorno:

Cierzo:

- La frecuencia con que sopla el cierzo en el centro del valle es del 40% y su velocidad media, 30km/h (8,33m/s). El Cierzo con velocidad superior a 60km/h (16,67m/s) se presenta en Zaragoza con una frecuencia del 2%. A medida que nos alejamos del centro del valle, la frecuencia e intensidad del cierzo disminuyen; así, en Huesca son, respectivamente, del 30% y 25km/h (6,94m/s), y en la ribera del Alto Jiloca (Calamocha), el cierzo, del norte o del nornordeste, reduce su frecuencia al 20% y su velocidad media a 23km/h (6,39m/s).
- Análisis de la Agencia Estatal de Meteorología muestran que con una media de 30 años con registro continuo de viento en Zaragoza, en 234 días se igualó o rebasó la velocidad en ráfaga de 100km/h (27,78m/s), lo que equivale a una media de 8 días por año.
- Es un viento muy frecuente en el valle, y se puede presentar en cualquier mes del año, no obstante, la mayor presencia de cierzo se produce entre los meses de diciembre a abril frente a una notoria disminución entre junio y noviembre.
- En el centro del valle pueden darse ráfagas de 100km/h. La máxima observada, según los datos disponibles, es de 160km/h (44,44m/s) en julio de 1954.

Bochorno:

- La mayor frecuencia del bochorno se da en las tierras bajas del valle y es del 16 %, y su velocidad media, de 13km/h (3,6m/s).

La siguiente figura, de elaboración propia, muestra la zona de la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona, que según los datos ya comentados de la Agencia Estatal de Meteorología, se vería más afectada por la influencia de los vientos fuertes del Cierzo en mayor medida y del Bochorno. Es como se puedes apreciar en la imagen, el tramo cercano a Zaragoza que transcurre por el Valle del

Ebro. De este tramo coloreado en rojo, las zonas más afectadas serían aquellas que fueran perpendiculares a la dirección predominante de los vientos, señalada en la imagen con líneas de color rojo.

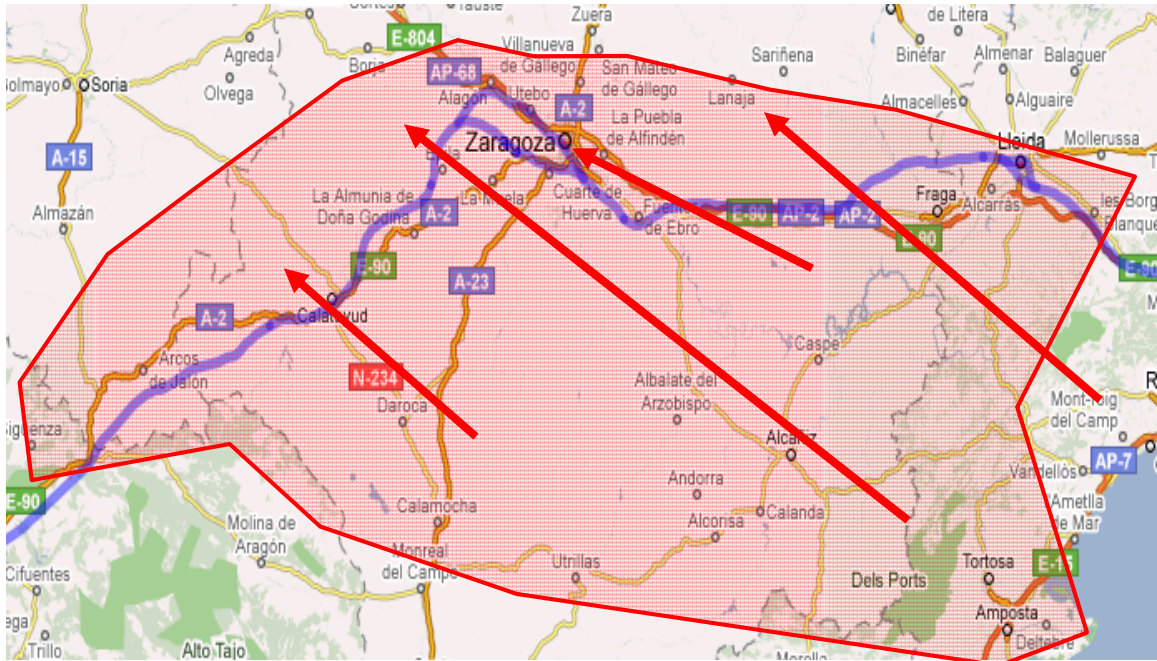


Imagen 3.8: Detalle de la LAV Madrid- Barcelona. La zona roja sería la más afectada por el viento fuerte, y las líneas marcan la dirección predominante de los vientos de la zona. Elaboración propia con Google Maps.

En la imagen 3.7 también se puede hacer el lector una buena idea de que zonas se verán más afectadas, aunque ahí el trazado es más aproximado, y en la imagen 3.8 que precede a este párrafo, el trazado es completamente riguroso.

Además a nivel más particular disponemos de los datos de dos estaciones meteorológicas, una situada en el aeropuerto de Zaragoza y otra en Lérida, ambas a escasos metros de la vía del tren. Los datos se corresponden con las mediciones de velocidad del viento y ráfaga a partir del 2005 y hasta septiembre del 2008, y se recogen en el anexo A.

Los datos relevantes del anexo son los de Zaragoza, pero se trataron también datos de Lérida para poder comparar y corroborar que el viento en el entorno de Zaragoza es realmente problemático.

Todos estos datos, así como sus gráficas y tablas ilustrativas están recogidas en el anexo A, pero a continuación se destacan las tablas y valores que puedan resultar ilustrativos, a la vez que se obtienen las conclusiones más significativas que justifican las decisiones posteriores.

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima alcanzada en el periodo	Media de días que se superan los 20m/s por año
Velocidad del viento	8m/s	4.3m/s	22.8m/s	
Velocidad de ráfaga	15m/s		30.4m/s	9.5 días/año

Tabla 3.1: Valores ilustrativos de la estación meteorológica de Zaragoza. Periodo: 1-1-05 al 30-9-08. Elaboración propia.

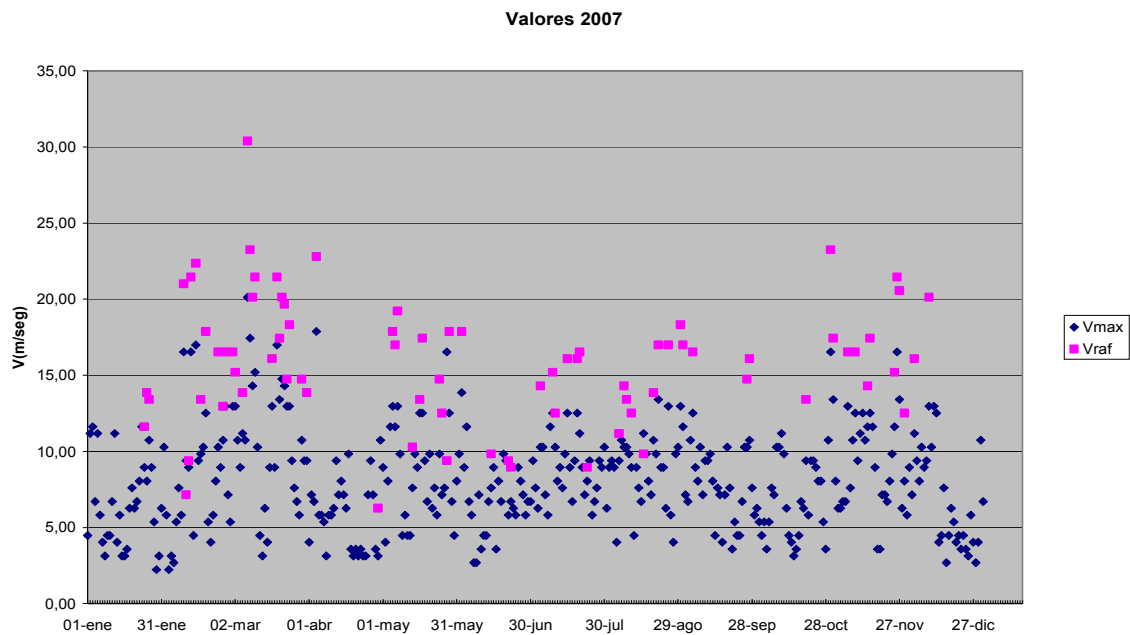


Imagen 3.9: Valores de viento representados gráficamente. Elaboración propia.

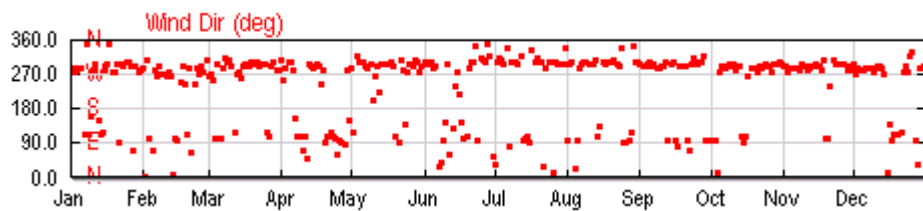


Imagen 3.10: Gráfico de la dirección media del viento en el año 2007 en Zaragoza. Fuente: www.wunderground.com.

La tabla 3.1 (tabla A.9 del anexo) refleja que los valores registrados a escasos metros de la vía en Zaragoza son bastante altos, sobre todo los valores correspondientes a rachas. Hay que tener en cuenta que estos valores están tomados a nivel del suelo, por lo que sobre terraplenes altos o viaductos serán aún más perjudiciales para la marcha del tren.

Si se comparan estos valores con los de la estación de Lérida (tablas A.14 a A.18) se observa que realmente los valores en Zaragoza son bastante mayores y por tanto merece que se centre la atención en esta región.

La imagen 3.9 muestra la distribución temporal de los vientos en el año 2007 para Zaragoza. Se pueden encontrar en el anexo las distribuciones de vientos en los otros años (Imágenes A.2 a A.5) y en Lérida (Imágenes A.11 a A.14).

En cuanto a dirección del viento, se presentan las gráficas que marcan la dirección del viento en el año 2007 en Zaragoza. Se puede comprobar, dirigiéndose al mencionado anexo (imágenes A.6 a A.9), que estas gráficas no son muy diferentes de un año a otro.

Con estos datos, y los restantes contenidos en el anexo A y no detallados en este apartado, es posible hacerse una composición de lugar del problema de los vientos en la zona del valle del Ebro, y en particular en lo que a los alrededores de Zaragoza se refiere:

- Las velocidades máximas de ráfaga pueden alcanzar los 30m/s un par de veces al año.
- Son habituales velocidades de ráfaga de más de 25m/s unos 9-10 días al año, en superficie.
- Con estos valores se estima que los vientos en viaducto pueden alcanzar los 40m/s como valor máximo a tener en cuenta.
- Como se puede ver en el diagrama de la Figura 3.1, estos vientos resultan muy peligrosos para la circulación de trenes de Alta velocidad en general.
- La dirección del viento queda claramente definida, se puede observar que hay dos claras franjas entre las que se reparten los vientos predominantes de todos los días, la correspondiente a los vientos de componente ONO (OesteNorOeste) que es la más densa y los vientos de componente ESE (Estesudeste) algo menos concurrida.
- Por lo tanto se puede decir que los vientos predominantes comparten dirección, soplan generalmente en la dirección ONO-ESE, y con más frecuencia en el sentido ONO.

En base a estas conclusiones que están fundamentadas en todos los datos que se registran en el anexo, se podrán definir los parámetros de viento en los siguientes apartados, velocidad de ráfaga entre los 25-35 m/s y dirección del viento ONO-ESE aproximadamente.

3.2.- ACERCAMIENTO TEÓRICO AL PROBLEMA.

Previamente a comenzar a exponer las fórmulas y desarrollos que gobiernan el problema, lo primero será plantear de manera teórica la cuestión y a partir de esta marcar las pautas que se seguirán.

Un flujo de aire lateral actuando contra las superficies exteriores del tren produce zonas de presión y depresión, y rozamientos viscosos que originan esfuerzos laterales y de sustentación, de naturaleza aerodinámica que pueden afectar a la estabilidad del tren.

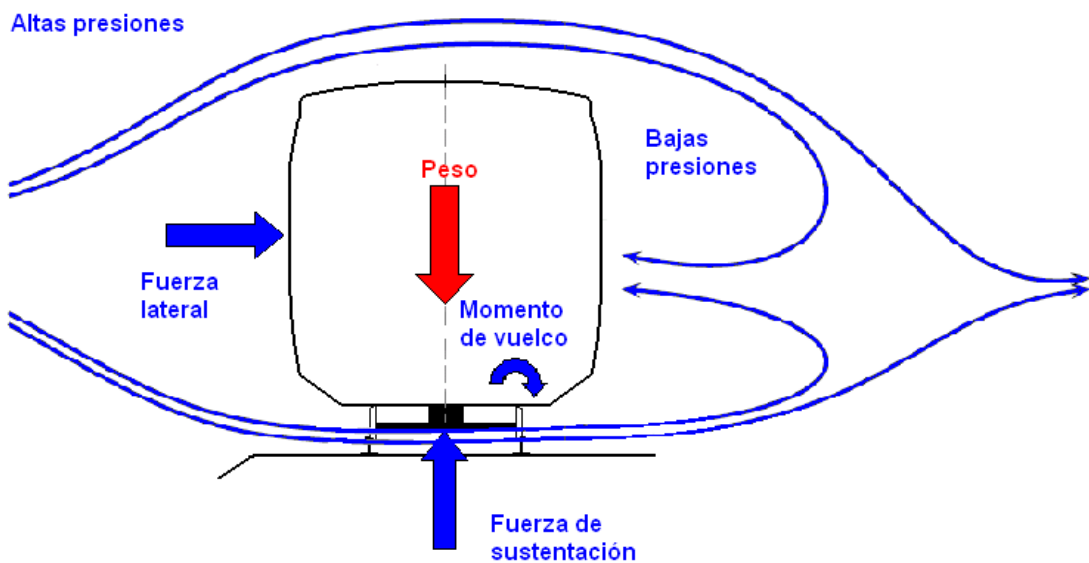


Imagen 3.11: Esquema de fuerzas y momentos aerodinámicos debidos al viento lateral.

Estos esfuerzos por si solos, o unidos a los provocados por la aceleración centrífuga al tomar una curva, provocan un momento de vuelco que, si el viento es considerable, puede provocar daños en las vías e incluso el vuelco del vehículo.

Es algo intuitivo pensar que al aumentar la velocidad del tren estos esfuerzos se hacen más notables, ya que a la velocidad del viento lateral se superpone la velocidad del tren, por lo que la velocidad relativa del viento con respecto al tren es mucho mayor.

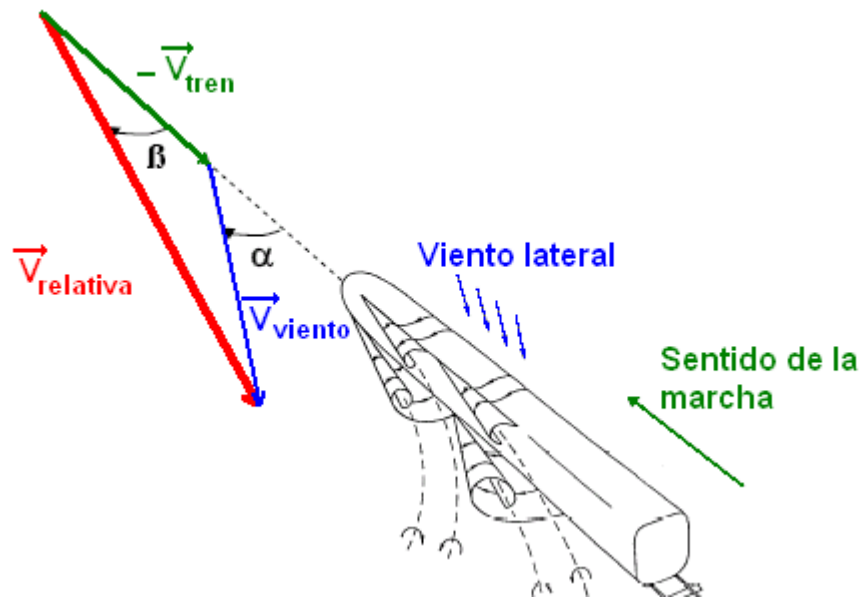


Imagen 3.12: Diagrama de velocidades sobre el tren.

Es esta velocidad relativa la que afecta a la estabilidad del tren, ya que los momentos y esfuerzos aerodinámicos dependen, como se verá en adelante de esta variable.

Para plantear el problema de manera ordenada lo primero será definir el flujo del viento, las ecuaciones que lo gobiernan, los modelos de turbulencia más adecuados, y el método numérico de resolución que emplea el problema, haciendo hincapié en las variables que serán necesarias para los siguientes apartados.

Una vez caracterizado el flujo se especificarán las ecuaciones que definen los parámetros y esfuerzos aerodinámicos. Estas ecuaciones dependerán de las variables anteriores, por lo tanto ya estará explicado su proceso de obtención.

A continuación se definirán los efectos de estas acciones aerodinámicas sobre la dinámica del tren, explicando la influencia de la velocidad de éste en las fuerzas y momentos aerodinámicos, las consecuencias de estos esfuerzos, y las condiciones que se fijan para mantener una operación ferroviaria segura en función de cada tipo de material rodante.

3.2.1.- DINÁMICA DE FLUIDOS DEL VIENTO.

3.2.1.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS AL CFD

Antes de comenzar a enumerar las ecuaciones de la dinámica de fluidos que se manejarán en este proyecto, cabe recordar al lector que se van a resolver mediante un programa de dinámica de fluidos computacional, o CFD. Es importante recalcar este punto, porque si bien las ecuaciones son generales para todos los modelos, el modo de tratarlas y resolverlas no es el mismo como se verá más adelante.

Considérese por ejemplo el flujo del aire alrededor de un ferrocarril, como es nuestro caso, aunque valdría cualquier otro objeto. En teoría, con las ecuaciones de Navier-Stokes, se puede calcular la velocidad y la presión del aire en cualquier punto (en un caso de flujo compresible o en el que haya transferencia de calor, también son variables a considerar la temperatura y la densidad). Esto permite calcular la resistencia aerodinámica, la sustentación producida por el aire, los momentos, etc.

Junto con estas ecuaciones, hay que utilizar y definir las condiciones iniciales y de contorno referentes a las variables y a las superficies sólidas. En este caso, las condiciones referentes a las variables, vienen definidas por la velocidad del tren, la del viento incidente y la presión, igual a la atmosférica en los puntos suficientemente alejados. Las condiciones de las superficies sólidas vienen definidas por la forma, expresada matemáticamente en las coordenadas adecuadas.

El programa transformará las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, y las resolverá únicamente en un número finito de puntos del espacio. Por eso, hay que representar el ferrocarril o, mas bien, su entorno mediante una malla de cálculo; cuanto mayor sea el número de puntos de esta malla, mayor será la precisión y realismo de la simulación, y más difícil de generar y resolver.

La velocidad y la presión del aire en los puntos del dominio más relevantes serán las variables a calcular en un primer momento, y a partir de ellas otras dinámicas.

3.2.1.2.- ECUACIONES DEL MOVIMIENTO DE UN FLUIDO.

Antes del estudio de las ecuaciones, se va a plantear las propiedades del fluido objeto del problema, el aire. Desde el punto de vista del estudio de la aerodinámica lateral de un tren de alta velocidad nos interesan dos propiedades fundamentales del aire, la densidad y la viscosidad.

La densidad (ρ) de un fluido se ve influenciada por la presión y la temperatura. Los trenes alcanzan velocidades máximas muy alejadas de la velocidad del sonido, y por tanto la variación de presión y temperatura en el campo del flujo varía poco con respecto a los valores correspondientes al flujo libre del fluido a cierta distancia del ferrocarril.

Para asentar esta afirmación se recurre al número de Mach, se puede afirmar que para gases como el aire, las variaciones relativas de densidad serán tanto menores cuanto más pequeño sea el cuadrado del número de Mach:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \sim \frac{V_0^2}{a_0^2} \sim M^2 \quad (3.2.1.1)$$

V_0 es la velocidad relativa del aire y a_0 la velocidad del sonido en el aire, que es de unos 340m/s. Para un tren que circule a 350km/h con viento lateral de 30m/s, es decir unas condiciones extremas, se tiene:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \sim \frac{V_0^2}{a_0^2} = \frac{\sqrt{(V_{tren}^2 + V_{viento}^2)}}{a_0^2} = \frac{\sqrt{(350/3.6)^2 + 30^2}}{340^2} = 8,8 \times 10^{-4} \quad (3.2.1.2)$$

Por tanto resulta apropiado suponer que la densidad no varía, y que el aire se comporta como un fluido incompresible. El valor de la densidad en condiciones normales (1atm y 288 K) para diferentes alturas está definido en la tabla 3.2.

La viscosidad (μ) está originada por el rozamiento molecular en el seno del fluido, el cual origina un gradiente de velocidad entre las partículas que se encuentran en contacto con la superficie del cuerpo y la superficie del fluido que circula libremente alrededor del mismo.

En fluidos incomprensibles solo se ve afectada por la temperatura. La tabla 3.2 muestra sus valores en función de la altura para las condiciones normales antes definidas.

Y (m)	ρ (kg/m ³)	μ (Ns/ m ²)	$\nu = \mu / \rho$ (m ² /s)
0	1.225	1.784×10^{-5}	1.456×10^{-5}
500	1.168	1.764×10^{-5}	1.510×10^{-5}
1000	1.112	1.747×10^{-5}	1.571×10^{-5}
1500	1.059	1.733×10^{-5}	1.636×10^{-5}
2000	1.007	1.717×10^{-5}	1.705×10^{-5}
2500	0.957	1.701×10^{-6}	1.777×10^{-6}
3000	0.909	1.684×10^{-6}	1.853×10^{-6}

Tabla 3.2: Valores de la densidad y de la viscosidad cinemática en función de la altitud.

La viscosidad del aire es la que provoca la resistencia aerodinámica, como consecuencia del rozamiento con las superficies, siempre que exista una capa límite con gradiente de velocidad. Considerando un tren como el de la figura.

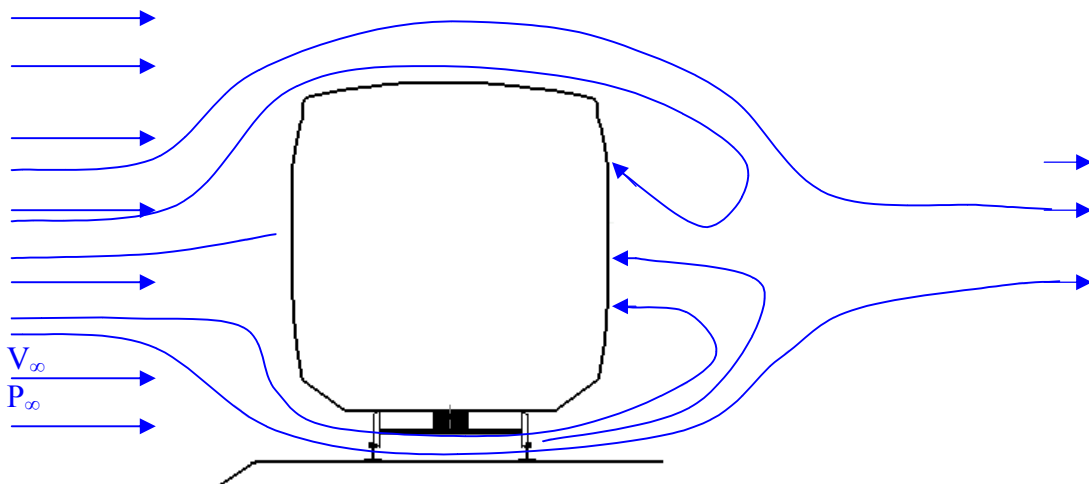


Imagen 3.13: Esquema bidimensional del flujo de aire alrededor de un tren.

En las zonas en las que no se producen separaciones entre el fluido y la superficie del vehículo, se forma una capa límite gobernada por la viscosidad del aire. La presión en esta capa límite viene determinada por el flujo que circula fuera de ella, que se comporta como no viscoso.

Es esta viscosidad la que genera una resultante no nula de presiones alrededor del cuerpo, responsable a su vez de la resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento de los cuerpos

Las ecuaciones que describen un fluido en movimiento se pueden deducir de la ley de conservación de la masa, y de la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Aplicando estas leyes de conservación a un elemento fluido, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes:

- Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.2.1.3)$$

- Conservación de la cantidad de movimiento (vectorial, 3 ecuaciones):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) + \nabla p = \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}_m \quad (3.2.1.4)$$

- Ecuación de la energía:

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla e \right) = \text{div}(k \nabla T) - p \nabla \cdot \vec{v} + \Phi_v + Q_r + Q_q \quad (3.2.1.5)$$

Es un sistema de cinco ecuaciones para cinco incógnitas, las tres componentes de la velocidad y las dos variables de estado e y p , y donde ρ es la densidad, μ es la viscosidad del fluido y $\vec{\tau}$ el tensor de esfuerzos viscosos que viene dado por:

$$\vec{\tau} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot \vec{v} \delta_{ij} \quad (3.2.1.6)$$

Pero si se simplifican estas ecuaciones para un flujo incompresible ($\rho=\text{cte}$), y considerando la gravedad como fuerza másica:

- Continuidad:

$$\text{div}(\vec{v}) = \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.2.1.7)$$

- Conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (3.2.1.8)$$

Ahora el problema mecánico se puede desacoplar del problema térmico, y como en este desarrollo no aparecen transferencias de calor, se puede obviar la ecuación de la energía.

De esta manera queda un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Resolviendo estas ecuaciones, se halla la velocidad del fluido, y la presión en cualquier punto del dominio estudiado.

Como se puede ver, son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que sólo en problemas con geometría y condiciones de contorno sencillas pueden ser resueltas de forma analítica, pero incluso en estos casos, la solución que se obtiene de manera analítica es la del flujo laminar. Pero habitualmente hay que contar con otro factor: la turbulencia, que hace que el flujo real se aparte bastante de la solución laminar.

3.2.1.3.- MODELOS DE TURBULENCIA

Para poder obtener una solución en un caso turbulento complejo, estas ecuaciones han de ser resueltas por métodos numéricos, con ayuda del ordenador y utilizando modelos de turbulencia, que complican más, si cabe, el proceso.

El medio que se suele utilizar para determinar si un flujo va a ser turbulento o no, es el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3.2.1.9)$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido.
- μ : Viscosidad del fluido
- U : Velocidad característica del fluido.

- D : Puede ser el diámetro, la altura o la longitud en función de si se quiere calcular el Re dentro de una tubería, alrededor de un obstáculo o a lo largo de una superficie.

Este número indica la relación, o la importancia relativa, entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de la corriente. Fuerzas inerciales grandes en relación con las viscosas tienden a favorecer la turbulencia, mientras que una viscosidad alta la evita. Dicho de otro modo, la turbulencia aparece cuando el número de Reynolds supera cierto valor.

Para flujos exteriores como el que ocupa este trabajo, se considera que el flujo es turbulento cuando:

- $Re > 5 \times 10^5$ a lo largo de una superficie de longitud D .
- $Re > 2 \times 10^4$ alrededor de un obstáculo de altura D .

Los modelos básicos de turbulencia que se utilizan actualmente varían en complejidad desde simples coeficientes de viscosidad ajustados hasta sistemas completos de ecuaciones adicionales. Todos ellos incluyen coeficientes que hay que ajustar para cada tipo de flujo y que, habitualmente, se obtienen por vía experimental.

Por otra parte, cada modelo tiene sus preferencias: van mejor con flujos abiertos o confinados, con separación o sin ella, etc. En definitiva, las simulaciones de flujos turbulentos promediados poseen sólo la exactitud de los modelos que incorporan.

A continuación se resumen muy brevemente algunos de los modelos que se pueden emplear en el programa de CFD seleccionado, comparándolos en una tabla. No se especificarán todas las complejas fórmulas que gobiernan cada modelo, y que están disponibles en el manual del programa (30), pero sí citar un poco las características de aquellos que se ajustan mejor al estudio que se va a realizar. Están ordenados de menor a mayor complejidad física.

Modelo	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
Spalart-Allmaras. Modelo de una ecuación.	Diseñado específicamente para aplicaciones aeroespaciales, capas límites con elevados gradientes de presión y turbomáquinas	Una sola ecuación, con lo que requiere de poca potencia informática. Útil para flujos no muy complejos.	No es muy fiable para modelos de Reynolds elevados, aunque puede ser efectiva para primeras medidas con mallados gruesos.
Standard k-epsilon. Modelo de 2 ecuaciones.	Muy usada en la industria. La ecuación de k se saca restando la energía mecánica instantánea de su valor promedio del tiempo, y la ecuación de epsilon a partir de razonamiento físico	Robusta, económica (informáticamente hablando), razonablemente exacta, y se dispone de muchos datos de funcionamiento acumulados en el tiempo.	Resultados mediocres para flujos complejos que implican gradientes de presión severos, fuertes cambios de dirección de las líneas de flujo, remolinos y rotaciones.
RNG k-epsilon. Modelo de 2 ecuaciones.	Es similar al anterior, pero incluye: el término adicional en la ecuación de epsilon que mejora el análisis de flujos rápidos, el efecto del torbellino sobre la turbulencia, la fórmula analítica para el número de Prandtl, la fórmula diferencial para determinar la viscosidad eficaz.	Bueno para problemas moderadamente complejos, como separadores de flujos, flujos arremolinados, y secundarios. Predicciones mejoradas para: fuertes cambios de dirección de las líneas de flujo, flujos de transición, y las transferencias de calor y masa.	Sujeto a las limitaciones debidas a la suposición que hace de viscosidad de torbellino isentrópica.
Realizable k-epsilon. Modelo de 2 ecuaciones.	Ofrece los mismos beneficios que el modelo RNG, pero resuelve algunas anomalías en flujos circulares.	Posee los mismos beneficios que el anterior pero además resuelve problemas de flujos circulares.	Los mismos inconvenientes que el RNG.
Modelo de esfuerzos de Reynolds, o Reynolds Stress Model.	RSM se obtiene de las ecuaciones de Navier-stokes hechas un promedio por Reynolds. RSM tiene un alto potencial para con exactitud predecir flujos complejos.	Físicamente es el modelo más completo (empleado en simulaciones de transporte aéreo, y para flujos de elevada turbulencia y complejidad)	Requiere más potencia de CPU, por lo que se hace necesario el empleo de superordenadores para realizar problemas medianamente complejos.

3.2.1.4.- DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE FLUJO.

Para que un programa de CFD pueda resolver las ecuaciones que describen el movimiento del fluido, éstas han de ser transformadas en expresiones algebraicas que sólo contengan números, combinados mediante operaciones sencillas, tales como sumar, restar y multiplicar.

La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, es lo que se llama proceso de discretización numérica. Dependiendo de los principios en que se basen hay varias técnicas de discretización, siendo las más usadas: diferencias finitas, volúmenes finitos, y elementos finitos. El programa de CFD que se empleará utiliza la discretización por volúmenes finitos.

En el anexo B se encuentra una breve introducción a esta técnica de discretización de las ecuaciones de flujo que se emplea en el programa FLUENT, junto con el análisis de estas ecuaciones.

La solución de un problema depende de las condiciones iniciales y de las condiciones de contorno a las que está sometido el fluido. Las condiciones de contorno más habituales que suelen aparecer en los problemas resueltos con CFD son las siguientes:

- Presión en un determinado contorno. Se puede fijar presión estática o presión total.
- Velocidad del campo fluido. Se puede fijar dirección y módulo, o sólo dirección, combinada con la condición de presión.

Imponiendo estas condiciones, se puede simular el comportamiento de los contornos reales de un fluido, tales como paredes, entradas en tuberías, salidas al exterior, etc.

Las paredes sólidas son condiciones de contorno especialmente críticas. Esto es debido al comportamiento del fluido en las proximidades de la misma. En las superficies sólidas se genera una capa límite de fluido en la que la velocidad varía rápidamente a medida que nos acercamos a la pared. La simulación directa de la capa límite es extremadamente difícil y requiere unos recursos desproporcionados, por lo que se suelen utilizar modelos específicos para estas zonas.

En el caso de este problema se empleará un modelo estacionario, y como no se necesita conocer en detalle el comportamiento de la capa límite alrededor de los obstáculos (barreras para viento y trenes) no se usarán modelos específicos para estas zonas, sino un modelo general de los definidos en el apartado anterior.

3.2.2.- PARÁMETROS Y ESFUERZOS AERODINÁMICOS.

Hasta ahora solo se han planteado las ecuaciones de flujo y su forma de resolverlas por parte de un programa de CFD, pero aún no se ha abordado el tema aerodinámico que provoca los esfuerzos.

Una vez caracterizado el flujo se pueden concretar las ecuaciones que definen los parámetros y esfuerzos aerodinámicos. Estas ecuaciones dependerán de las variables definidas anteriormente, especialmente de la presión y velocidad del fluido en cada punto, o lo que es lo mismo, de la presión total:

$$P_{total} = P_{estática} + P_{dinámica} = P + \frac{\rho}{2} U^2 \quad (3.2.2.1)$$

Donde a partir de ahora P será la presión (Pa) y U la velocidad del fluido en (m/s).

La resistencia o esfuerzo que el aire genera al fluir alrededor de un obstáculo puede expresarse en función de la presión dinámica arriba definida, de una superficie característica de contacto, y un coeficiente adimensional:

$$F_{aerodinámica} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_a \cdot A \cdot U^2 = C \cdot U^2 \quad (3.2.2.2)$$

Donde A es el área frontal sobre la que incide el aire y C_a el coeficiente de resistencia aerodinámica. Este coeficiente depende del número de Reynolds previamente definido, y por tanto esta ecuación no es rigurosamente cierta;

$$C_a = \frac{Cte}{Re^n} \text{ donde } \begin{cases} n = 0 \rightarrow \text{Pared muy rugosa} \\ n = \frac{1}{5} \rightarrow \text{Pared muy lisa} \end{cases} \quad (3.2.2.3)$$

Como la rugosidad en la superficie de los trenes es pequeña se puede considerar que el Re influye poco, y por tanto que la fórmula de la fuerza aerodinámica es correcta, o al menos que está sobredimensionada, ya que cualquier valor de Re alto haría rebajar la fuerza aerodinámica.

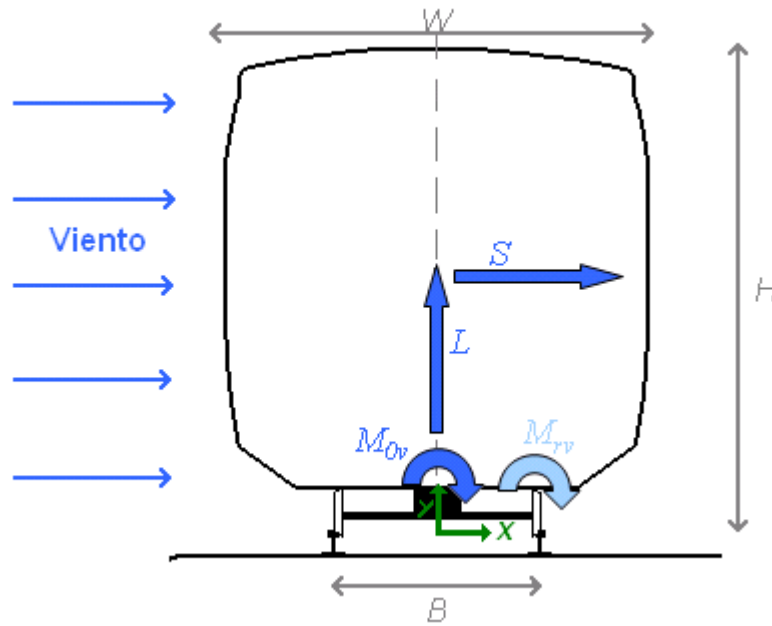


Imagen 3.14: Esquema de fuerzas y momentos aerodinámicos

En la figura superior se definen las fuerzas y momentos, donde L es la componente de la fuerza aerodinámica en la dirección perpendicular a la velocidad del viento lateral no perturbado y sentido positivo hacia arriba, S es la componente de la fuerza aerodinámica en la dirección y sentido de la velocidad del viento lateral no perturbado, M_{0v} es el momento de las fuerzas aerodinámicas por unidad de longitud respecto al centro geométrico del vagón y positivo a balancear el tren a sotavento, H es la altura, W el ancho del vagón del tren y B el ancho de vía.

Como nuestro problema es bidimensional conviene definir estas fuerzas y momentos por unidad de longitud característica del tren, siendo:

$$\begin{aligned}
 l &= L / l_{caract} \\
 s &= S / l_{caract} \\
 m_{0v} &= M_{0v} / l_{caract}
 \end{aligned}
 \tag{3.2.2.4}$$

Cada una de estas fuerzas y momentos llevarán asociados sus coeficientes adimensionales como los anteriormente definidos, de tal forma que:

$$\begin{aligned}
 C_s = C_x &= \frac{s}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 H} \\
 C_l = C_y &= \frac{l}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 W} \\
 C_{m_{0v}} &= \frac{m_{0v}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 H W}
 \end{aligned} \tag{3.2.2.5}$$

Donde $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ es, como ya se precisó, la presión dinámica de la corriente de aire incidente sobre el tren, siendo U_∞ la velocidad de la corriente de aire sin perturbar aguas arriba de los modelos.

Se pueden definir las fuerzas y momentos como integrales de la presión ejercida sobre cada pared en la que se aplican. Estas integrales serían a lo largo de la longitud característica sobre la que se ejercen. Una vez definidas, el momento se puede escribir de forma similar. Los ejes “x” y “y” son los definidos en la Imagen 3.17, \vec{i} y \vec{j} son los vectores unitarios según estos ejes respectivamente y el vector normal $d\vec{l}$ tiene la dirección normal al contorno del tren y sentido negativo hacia fuera de él.

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \oint C_p(x, y) \cdot \vec{i} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \int_z C_p(x, y) \cdot dy \\
 l &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \oint C_p(x, y) \cdot \vec{j} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \int_x C_p(x, y) \cdot dx \\
 m_0 &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \left(\oint y \cdot C_p(x, y) \cdot \vec{i} \cdot d\vec{l} - \oint x \cdot C_p(x, y) \cdot \vec{j} \cdot d\vec{l} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \left(\int_z y \cdot C_p(x, y) \cdot dy - \int_x x \cdot C_p(x, y) \cdot dx \right)
 \end{aligned} \tag{3.2.2.6}$$

En estas ecuaciones aparece un nuevo coeficiente, C_p , que es el coeficiente de presión:

$$C_p(x, z) = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \tag{3.2.2.7}$$

Donde P es la presión local sobre el punto de la superficie del cuerpo sobre la que se evalúa el coeficiente, y P_{∞} es el valor de presión corriente arriba de ese punto donde la corriente aún no está perturbada.

Antes de finalizar este punto, cabe recordar que como se vio antes, el programa de CFD no calcula una función de la presión a lo largo del contorno, sino en un número finito de puntos marcados por el mallado. Por tanto las integrales vistas anteriormente (3.2.2.6) deben presentarse como sumatorias en base a estos puntos:

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \sum_n C_p(x, y) \cdot \vec{i} \cdot \Delta \vec{l} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \sum_n C_p(x, y) \cdot \Delta y \\
 l &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \sum_n C_p(x, y) \cdot \vec{j} \cdot \Delta \vec{l} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \sum_n C_p(x, y) \cdot \Delta x \\
 m_0 &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \left(\sum_n z \cdot C_p(x, y) \cdot \vec{i} \cdot \Delta \vec{l} - \sum_n x \cdot C_p(x, y) \cdot \vec{j} \cdot \Delta \vec{l} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \left(\sum_n y \cdot C_p(x, y) \cdot \Delta y - \sum_n x \cdot C_p(x, y) \cdot \Delta x \right)
 \end{aligned} \tag{3.2.2.8}$$

Donde los Δl , que luego son Δx y Δz , son las distancias entre los puntos en los que está evaluada la presión.

Todas estas fórmulas no se emplearán, ya que el programa es capaz de darnos los valores de l , s y m_0 a partir de unos parámetros, pero se considera que es necesario conocer el fundamento físico y la formulación de estas tres variables para fijar correctamente estos parámetros y entender su significado.

Serán por tanto estas tres variables, que dependen como se ha comprobado de la presión en cada punto, las que se utilizarán para calcular los esfuerzos sobre el ferrocarril y su influencia sobre la dinámica de este.

3.2.3.- ACCIONES AERODINÁMICAS Y DINÁMICAS SOBRE EL FERROCARRIL.

La aerodinámica de los vehículos tiene como objeto el estudio del conjunto de acciones y efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, para lograr que estos efectos sean lo más favorables posibles.

En este apartado se expone la formulación matemática de estos efectos y su interrelación con la dinámica en condiciones habituales de operación.

La acción del viento provoca unos esfuerzos que se superponen a los que ya de por sí se plantean en un ferrocarril que circula a alta velocidad, su propio peso, la aceleración lateral, etc. En la siguiente figura se puede ver un esquema de las principales fuerzas que se considerarán.

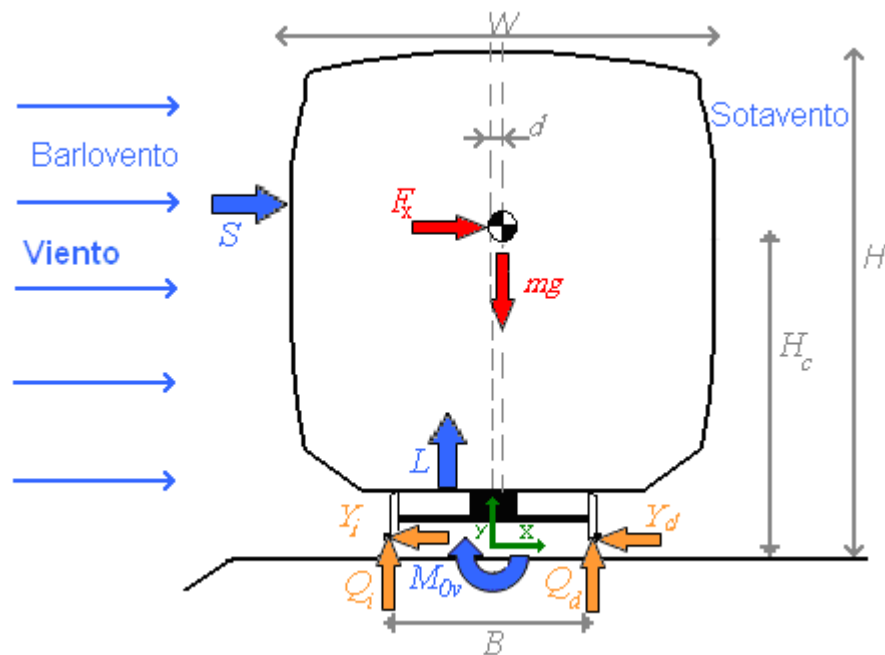


Imagen 3.15: Esquema de las fuerzas dnámicas consideradas.

Donde están representadas:

- F_x : Es la fuerza lateral sobre el tren, provocadas por la aceleración lateral propia del movimiento del tren al tomar curvas. Se considera aplicada en el centro de gravedad.
- mg : Es el peso del vehículo aplicado en su centro de gravedad.
- S , L y M_{ov} : Son las fuerzas y momentos consecuencia del viento que quedaron definidas a partir de las ecuaciones 3.2.2.4 y 3.2.2.6.
- Q_i y Q_d son los sumatorias de todas las reacciones verticales aplicadas sobre las ruedas.
- Y_i y Y_d son las sumatorias de todas las reacciones horizontales sobre las ruedas.

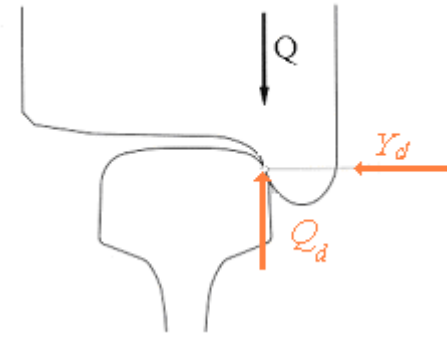


Imagen 3.16: Detalle del contacto rueda- carril.

Además hay una variable que es la que se empleará para evaluar la bondad de las soluciones adoptadas, la descarga relativa del eje de barlovento.

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{Q_i - Q_0}{Q_0} \quad (3.2.3.1)$$

Donde:

- Q_0 es la sumatoria de las cargas estáticas por eje.

$$2Q_0 = -mg \quad (3.2.3.2)$$

- Q_i es la carga en el eje de barlovento.

Haciendo equilibrio de momentos en el punto fijado como origen de coordenadas (punto medio entre las cabezas de los raíles) se puede escribir:

$$\sum M_0 = M_{0v} + (F_x + S).H_c + mg.d + (Q_i - Q_d).B/2 \quad (3.2.3.3)$$

$$(Q_i + Q_d) = L - mg \rightarrow Q_d = L - Q_i - mg \quad (3.2.3.4)$$

Con ambas ecuaciones, considerando que d es despreciable resulta que:

$$\begin{aligned} (2Q_i + mg - L).B/2 &= M_{0v} + (F_x + S).H_c + mg.d \\ Q_i &= M_{0v} / B + (F_x + S)H_c / B - mg / 2 + L / 2 \end{aligned} \quad (3.2.3.5)$$

Y la descarga relativa nos queda que es:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta Q}{Q_0} &= \frac{Q_i - Q_0}{Q_0} = \\
 &= \frac{(M_{0v} / B + (F_x + S)H_c / B - mg / 2 + L / 2) + mg / 2}{mg / 2} = \\
 &= \frac{M_{0v} / B + (F_x + S)H_c / B + L / 2}{mg / 2}
 \end{aligned} \tag{3.2.3.6}$$

Como se indicó anteriormente, se obtendrán los valores de l , s y m_{0v} del programa, que será necesario evaluar usando la expresión 3.2.2.4, para convertirlos en L , S y M_{v0} . Con estos valores es posible evaluar el coeficiente de descarga relativa y su valor para todo el tren.

Para dar una idea decir que los criterios más conservadores fijan valores de descarga relativas permisibles de 0,7, pero otros como el llamado criterio DEUFRAKO considera valores seguros hasta los 0,9.

En este proyecto no se van a obtener valores reales de la dinámica del tren, ya que para ello sería necesario recurrir a un programa de MBS, pero si se puede a través de las fórmulas planteadas sacar conclusiones que permitan comparar diferentes tipos de trenes.

3.2.4.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INTEROPERABILIDAD.

La legislación europea establece, como se recogió en el apartado 2.4, las especificaciones técnicas de interoperabilidad (directiva 2004/50/CE) con un apartado dedicado al subsistema material rodante (22).

En él se establecen las especificaciones funcionales y técnicas relativas a las condiciones ambientales, en particular las referentes a la circulación con viento cruzado, con los valores para plantearse la confección de curvas características de viento también conocidas como CWC por sus siglas en inglés.

Ésta ETI establece una serie de requisitos para evaluar la conformidad del material rodante a través de tablas que establecen los valores límite de circulación para diferentes velocidades de viento cruzado incidente con diferentes ángulos respecto a la vía y diferentes aceleraciones laterales del tren.

Velocidad del tren en km/h	Velocidad del viento característica de referencia para el caso de suelo plano (sin balasto ni carriles) en m/s.	Velocidad del viento característica de referencia para el caso de de referencia para el caso de terraplén en m/s
120	38,0	34,1
160	36,4	31,3
200	34,8	28,5
250	32,8	25,0
260	32,4	24,5
270	32,0	24,0
280	31,6	23,5
290	31,2	23,0
300	30,8	22,5
310	30,4	22,0
320	30,0	21,5
330	29,6	21,0
340	29,2	20,5
350	28,8	20,0

Tabla 3.3: Velocidad del viento característica de referencia para viento perpendicular a la vía y vehículo en vía recta sin aceleración lateral. Fuente: Eurolex.

Velocidad del tren en km/h	Velocidad del viento característica de referencia para el caso de suelo plano (sin balasto ni carriles) en m/s con aceleración lateral de 0,5m/s²	Velocidad del viento característica de referencia para el caso de suelo plano (sin balasto ni carriles) en m/s con aceleración lateral de 1,0m/s²
250	29,5	26,0
260	29,1	25,6
270	28,7	25,2
280	28,3	24,8
290	27,9	24,4
300	27,5	24,0
310	27,1	23,6
320	26,7	23,2
330	26,3	22,8
340	25,9	22,4
350	25,5	22,0

Tabla 3.4: Velocidad del viento característica de referencia para viento perpendicular a la vía y vehículo en curva con aceleración lateral. Fuente: Eurolex.

Velocidad del tren en km/h	Velocidad del viento característica de referencia en m/s para diferentes ángulos de incidencia del viento con respecto a la vía.							
	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
250	24,6	25	26,1	28,4	32	38,1	45	45
260	24,1	24,5	25,6	27,8	31,4	37,4	45	45
270	23,6	24	25,1	27,2	30,7	36,6	45	45
280	23,1	23,5	24,6	26,7	30,1	35,8	45	45
290	22,6	23	24,1	26,1	29,5	35,1	45	45
300	22,1	22,5	23,5	25,5	28,8	34,3	45	45
310	21,7	22	23	25	28,2	33,5	43	45
320	21,2	21,5	22,5	24,4	27,5	32,8	42,1	45
330	20,7	21	22	23,8	26,9	32	41,1	45
340	20,2	20,5	21,4	23,2	26,3	31,3	40,1	45
350	19,7	20	20,9	22,7	25,6	30,5	39,1	45

Tabla 3.5: Velocidad del viento característica de referencia para vehículo sobre terraplén de 6m en vía recta. Fuente: Eurolex.

Estas tablas constituyen un medio para limitar la velocidad de circulación de todos los trenes de alta velocidad europeos cuando se ven sometidos a vientos laterales, por tanto es una norma general y no constituye en ningún modo la limitación física real de algunos trenes.

Como los análisis que se efectuarán en este proyecto son en dos dimensiones, no se puede representar la velocidad del tren, pero estos valores de las tablas permiten comparar los valores de viento obtenidos con las limitaciones impuestas por las especificaciones, y de esta manera permiten evaluar la bondad de las soluciones propuestas.

Sirva el siguiente ejemplo para ilustrar como se va a proceder. Supóngase un tren que circula por una vía en terraplén, afectado por viento lateral perpendicular a su dirección y de valor 25m/s. Según la legislación europea, y como se puede ver en la tabla 3.3, su velocidad límite es de 250km/h.

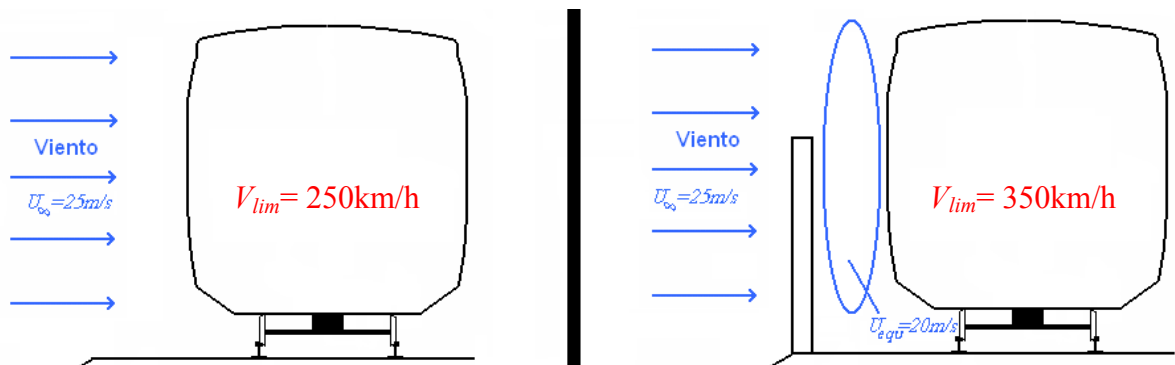


Imagen 3.17: A la izquierda vía sin parapeto y a la derecha vía protegida a barlovento por un parapeto.

Si esta misma línea estuviera protegida por una medida de mitigación como puede ser una barrera lateral, y se supone que en la zona entre el tren y la barrera de la figura de la izquierda las condiciones de presión y velocidad del viento son equivalentes a un viento incidente sin protección de 20m/s, el tren podría circular a 350km/h.

Sirva este ejemplo para ilustrar la forma en que se considerarán los valores recogidos en las correspondientes ETI. Hay que tener en cuenta las limitaciones de esta técnica, ya que la introducción de barreras modifica el flujo del aire, y por tanto puede causar otras modificaciones en este que pueden ser perjudiciales como remolinos y depresiones que no se tienen en cuenta.

Pero entendiendo y asumiendo las simplificaciones del modelo se puede considerar que estas comparaciones pueden servir como indicativo de las mejoras de las medidas propuestas además de enmarcarlas dentro de una legislación vigente en la Unión Europea.

3.2.5.- MECANISMOS DE EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

A partir de la formulación anteriormente expuesta, se pasa a definir cuales van a ser los mecanismos que se emplearán para evaluar la bondad de las soluciones adoptadas:

- Como análisis preliminar se obtendrán los datos de presión (P) y velocidad del fluido (U) alrededor del tren en modelos, así como de los obstáculos en modelos sencillos. En esta primera observación también se hará hincapié en ver la forma de las líneas de flujo.
- Se evaluarán los coeficientes de la ecuación 3.2.2.5, que darán una medida de los efectos sobre el tren, tanto sobre la fuerza lateral, la sustentación y el momento. Estos coeficientes serán de mucha utilidad, ya que al ser adimensionales permiten comparar los efectos de distintos tipos de barreras.
- Se estudiarán los efectos de las medidas de mitigación propuestas sobre los diferentes tipos de trenes. Para compararlos se empleará la ecuación 3.2.3.6, donde la descarga relativa da una idea aproximada de los efectos sobre cada tipo de tren.
- Por último se compararán las medidas correctoras propuestas usando los valores proporcionados por las ETI.

3.3.- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS Y PROGRAMAS EMPLEADOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.

Como se vio en el estado del arte es habitual que este tipo de estudios se realice con túneles de viento. En este proyecto se ha sustituido toda la instrumentación y los medios necesarios para realizar pruebas en túnel de viento por una serie de programas informáticos.

Estos programas a día de hoy no llegan a la precisión de los ensayos a escala, pero si permiten la realización, monitoreo y ensayo de muchos más modelos de forma económica y cada día más eficaz.

A continuación se enumeran y caracterizan los programas empleados para la creación de los modelos así como para su ensayo, para que el lector pueda apreciar sus fortalezas y debilidades, el porqué de su elección y los resultados que cabe esperar de ellos.

3.3.1.- PROGRAMAS DE DISEÑO GRÁFICO.

Para el diseño gráfico se han empleado dos programas muy diferentes, por un lado una herramienta de CAD como es CATIA y por otro el programa GAMBIT, una herramienta de diseño que viene asociada al programa de CFD empleado y que se describe más adelante.

Seguidamente se exponen las características de cada uno de estos dos programas, para que el lector pueda explicarse el por qué de su empleo.

CATIA es el Principal producto de la oferta PLM de Dassault Systèmes, y es una aplicación que permite de una manera dinámica el diseño de perfiles y formas en dos y tres dimensiones. Además permite realizar ensayos de tensiones y visualizaciones de forma rápida, con lo que es una herramienta tremendamente útil para realizar los primeros diseños y bocetos y testar su eficacia.

En lo referente a este proyecto se emplea para realizar los primeros bocetos de las plataformas de vías, de los trenes y sobre todo de las barreras laterales. Una vez se obtienen y se verifican estos bocetos se trasladan estas geometrías al programa GAMBIT.

GAMBIT es la herramienta de diseño asociada a FLUENT. Al contrario que CATIA es un programa mucho menos dinámico, con una interfaz más incomoda y

menos opciones de rediseño que CATIA. Aún así su uso es necesario para generar una geometría compatible con el programa de CFD que se usará; FLUENT.

Pero no solo se empleará GAMBIT para la generación de la geometría, su uso y manejo adquiere una gran importancia a la hora de definir los elementos básicos que un software de CFD como FLUENT necesita para hacer los cálculos.

Lo primero es lo que se conoce como un mallado o mesh. Para crearlo se utilizará obligatoriamente el programa GAMBIT. También se marcarán con este programa las zonas donde van las condiciones de contorno.

Representar el entorno de trabajo a simular mediante una malla de cálculo es uno de los pasos más importantes dentro del ensayo de perfiles aerodinámicos con CFD, cuanto mayor sea el número de puntos de esta malla, mayor será la precisión y realismo de la simulación, y más difícil de generar y resolver. En casos con geometría complicada, esta fase puede ocupar días e incluso semanas.

3.3.2.- PROGRAMA DE CFD.

El software de CFD busca el cálculo detallado del movimiento de los fluidos por medio de la utilización del ordenador para la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen estos fluidos.

En los resultados de estas técnicas, junto con el movimiento y la presión, pueden obtenerse las variaciones de las propiedades, las fuerzas que ejercen sobre los sólidos adyacentes, los intercambios de energía, etc.

Estos programas tienen mucha aplicación en estudios de aerodinámica de vehículos terrestres, como es el caso del proyecto que nos ocupa.

Las ecuaciones que definen en cualquier punto del espacio la velocidad y presión de un fluido fueron descubiertas hace más de siglo y medio por el ingeniero francés Claude Navier y el matemático irlandés George Stokes. Estas ecuaciones se derivan directamente de las leyes del movimiento de Newton, y son, como se indicó en el planteamiento teórico del problema, ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Las ecuaciones son las mismas para cualquier situación de flujo de fluidos, pero a particularización a los casos concretos viene definida por las condiciones de contorno y los valores iniciales.

Estas ecuaciones son lo suficientemente complicadas como para que su solución analítica sólo sea posible en casos muy elementales. La utilización del ordenador para su resolución numérica es lo que ha dado origen a la dinámica de fluidos computacional o CFD.

Para resolver el problema, el programa de CFD transforma las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, y las resuelve, únicamente en un número finito de puntos del espacio, en las mallas generadas con el ya citado GAMBIT.

De cara a este estudio, este software nos permite obtener una gran cantidad de datos sin necesidad de tener que recurrir a los costosos ensayos en túnel de viento. De esta manera se puede ahorrar en tiempo y dinero además de que permite probar con múltiples variables en poco tiempo.

Aún así hay que tener claras las limitaciones actuales de los programas de CFD, que implican la necesidad de simplificar el fenómeno a estudiar para que el hardware y software sean capaces de tratarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.

Este estudio pretende obtener unos resultados cualitativos que nos permitan comparar diferentes modelos de barreras, trenes, etcétera, por lo tanto los valores cuantitativos no son la mayor preocupación y se puede asumir el riesgo de que los valores que proporcione el CFD no sean cuantitativamente exactos, pero si han de mantener, obviamente unos ordenes de magnitud correctos y razonables.

En el apartado 3.2 de este mismo capítulo, “Acercamiento teórico del problema” se han descrito con detalle las ecuaciones y métodos de cálculo que emplea el programa y su forma de resolución mediante el método de los volúmenes finitos.

3.4.- METODOLOGÍA EMPLEADA EN LAS SIMULACIONES CON CFD.

Las simulaciones con CFD, se parecen mucho en cuanto a metodología de trabajo a las simulaciones en túnel de viento, si bien constituyen una herramienta más peligrosa a la hora de obtener y sobre todo de interpretar los resultados.

Por eso se hace más necesario definir punto por punto una metodología a desarrollar que permita tener claras las pautas de trabajo y consiga que todos los

ensayos se enmarquen bajo un mismo patrón, de manera que los resultados cualitativos si sean perfectamente correctos.

En los paquetes de software existentes de CFD, y en concreto en este que se empleará (FLUENT), el usuario debe especificar las condiciones de los problemas que se van a resolver, así como proveer al ordenador de ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una correcta solución del problema. Los pasos genéricos que hay que seguir son:

- a) Planteamiento de todos los parámetros que definen el problema, de manera que no queden dudas sobre el resto de actuaciones que se van a acometer.
- b) Especificación de la geometría del problema. Es preciso introducir al programa los contornos del dominio del problema. Este proceso es relativamente simple cuando el modelo es bidimensional, pero aún así puede llevar días hacerlo si el modelo, como es el caso, tiene pequeños detalles y no es el típico paralelepípedo en un entorno rectangular. Cuando el modelo es tridimensional, la especificación de la geometría puede ser realmente compleja.
- c) Especificación de las propiedades del fluido, tales como la viscosidad, la densidad, las propiedades térmicas..., etc. Deben ser capaces de manejar, con la ayuda del programa, las ecuaciones de variación de estas propiedades con respecto fundamentalmente a la velocidad y a la presión, que serán los parámetros básicos de nuestro proyecto, de los que después se obtendrán coeficientes de presión, de sustentación, etc.
- d) Definición de los modelos que se van a utilizar. En este caso se necesita definir los modelos de infraestructura, de trenes, y de turbulencia. Para esto último se elige un modelo de turbulencia que estando implementado en el software se adapte lo más posible al problema.
- e) Creación del mallado, o celdas en las que van a ser calculadas todas las variables. El mallado puede ser estructurado o no estructurado. El mallado estructurado está formado por rectángulos o paralelepípedos ordenados, que pueden deformarse para adaptarse a las superficies curvas de la geometría. El mallado no estructurado está habitualmente

formado por triángulos o tetraedros y, en cualquier caso, no tiene un orden matricial. Este último tipo de mallado es mucho más sencillo de ajustar a formas complejas que el anterior, aunque es más costoso de calcular.

- f) Imposición de las condiciones de contorno, que controlan los valores de ciertas variables en los límites del dominio. Básicamente se imponen valores fijos de la presión, y velocidad, o de sus gradientes. También hay que imponer condiciones para las variables de turbulencia que haya, según el modelo que se esté utilizando.
- g) Introducción de las condiciones iniciales. En el caso de un problema no estacionario, hace falta definir unos valores de las variables para todos los puntos del dominio, desde los cuales empezará el programa a calcular las soluciones de los sucesivos pasos temporales. En el caso de un problema estacionario, es preciso introducir al programa unos valores iniciales de las variables, de los cuales partirá el proceso iterativo.
- h) Control de los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema. Se puede actuar sobre el proceso iterativo definiendo los tipos de discretización, variando los factores de relajación, y fijando los criterios de finalización de las iteraciones.
- i) Proceso de cálculo. Durante el mismo es habitual monitorizar la convergencia y controlar la evolución de las variables en algunos puntos.
- j) Análisis de la solución. Comprobación de que la resolución es correcta y estudio de los resultados. La gran cantidad de datos que se genera hace recomendable el uso de sistemas de postproceso gráficos, que hacen más cómoda la visualización, y más en este caso que se pretende realizar un análisis meramente comparativo.

Esta metodología será la que se emplee en los apartados siguientes, y por tanto la que marque el desarrollo de los siguientes capítulos del proyecto. De manera más o menos aproximada se puede decir que el capítulo 4 se corresponderá con los puntos a, b y c, el punto d con el capítulo 5, y los puntos siguientes estarán reflejados en el capítulo 6, que será donde se realice el preproceso (puntos e, f, g y h), monitoreo del proceso (punto i) y postproceso y análisis de los ensayos realizados con CFD (punto j).

4. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y AERODINÁMICOS.

CAPÍTULO 4: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y AERODINÁMICOS.

Este capítulo recogerá los parámetros geométricos que definen el proyecto, es decir, las medidas y esquemas que darán lugar a la posterior elaboración de los modelos a simular.

Estos parámetros se pueden clasificar en tres grupos, los relativos a las infraestructuras, al material rodante y finalmente a las medidas de mitigación en forma de barreras o pantallas para viento.

Los parámetros relativos al viento, como modelos de turbulencia o velocidades del viento no se definirán en este capítulo, ya que se considerarán a todos los efectos como condiciones operacionales y de contorno del problema y se fijarán por tanto cuando se planteen los modelos en el siguiente capítulo.

4.1.- INFRAESTRUCTURAS.

Una línea de alta velocidad (L.A.V) es una línea de ferrocarril con unas especificaciones muy rigurosas y con unas condiciones capaces de soportar un servicio de trenes alta velocidad con los máximos niveles de seguridad a velocidades superiores a los 200-220km/h.

Su implementación, construcción y medidas están regularizadas por normas UNE y legislación europea. Obviamente el ancho de vía es la más importante, pero también se fijan otras como el gálibo del tren, la distancia entre ejes de vía, las pendientes de las torrenteras, la distancia al eje de la catenaria, etc.

De modo que la forma y las medidas de las vías y las infraestructuras que las rodean, están más o menos normalizadas. Se pueden encontrar pequeños cambios entre una LAV y otra, pero no son muy importantes, al menos en las de España.

4.1.1.- DESCRIPCIÓN DE LAV OBJETO DEL PROYECTO.

La infraestructura que se va a modelar en este proyecto es, como se justifica en el punto 1 del capítulo 3, la línea de alta velocidad (LAV) que une

Madrid con Barcelona, por sus especiales condiciones orográficas y climatológicas ya descritas anteriormente.

El tramo de 621km entre Madrid y Barcelona de la LAV Madrid - Zaragoza - Barcelona - Frontera Francesa es una línea con velocidad de proyecto de 350km/h, y velocidad máxima autorizada actualmente de 300km/h excepto en algunos tramos (por ejemplo Calatayud - Ricla) cuyo planeamiento se habían iniciado en los años 80 cuando se pensaba en velocidades máximas de 200 a 250km.

La velocidad media del servicio de alta velocidad en esta línea es de 236km/h, pero está en la mano de estudios de investigación como este aumentar la media de circulación.

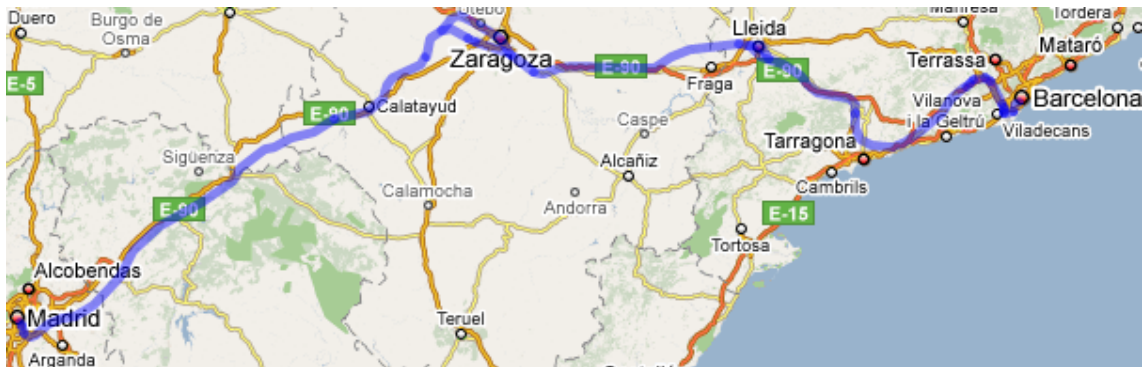


Imagen 4.1: Trazado de la LAV Madrid- Barcelona. Elaboració propia a partir de Google Maps.

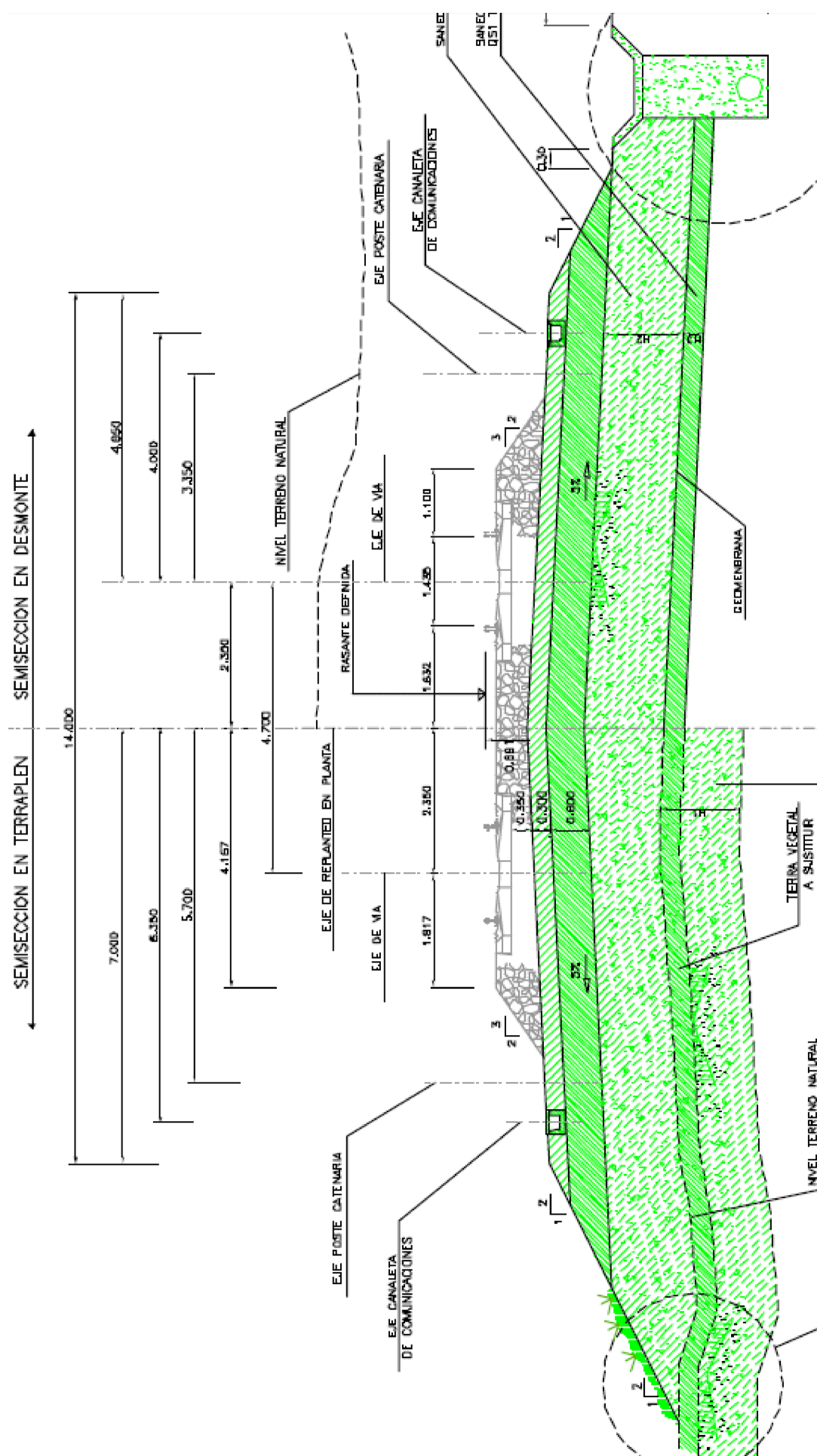
En los siguientes apartados se presentarán los esquemas de las vías y raíles para poder tener todos los parámetros necesarios para simularlas en los posteriores modelos.

4.1.2.- ESQUEMAS DE VÍAS.

De cara a este estudio, lo que más interesa es poder recrear un modelo en dos dimensiones de la vía del tren, tanto en terreno firme como en viaducto. Para ello es necesario conocer los parámetros y dimensiones de las vías y a partir de ellos se generarán los modelos.

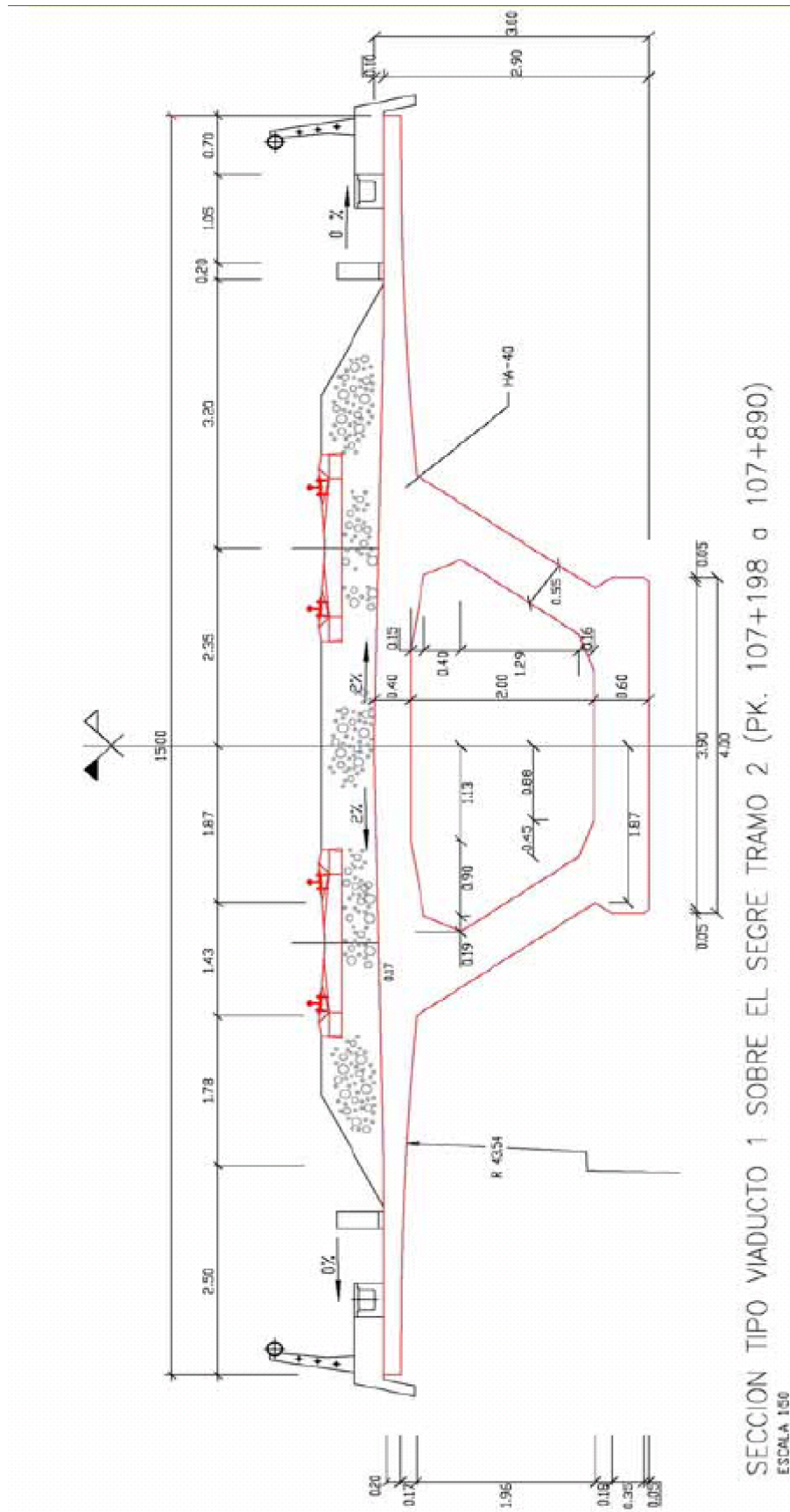
Por tanto lo que se ha necesitado ha sido los cortes transversales o secciones tipo de las vías. La sección tipo de distintos tramos son bastante parecidas entre sí, y por tanto lo que se ha hecho ha sido elegir unas generales que representen a la mayoría de los tramos.

A continuación se expondrán los esquemas de vía de secciones tipo de tramos que corresponden a la LAV Madrid- Barcelona. Se puede observar que los esquemas, aún siendo de diferentes empresas y corresponder a distintos tramos, guardan bastante similitud como para considerar que se puede construir a partir de ellos un modelo bastante general.



Esquema 4.2: Sección tipo de vía doble sobre terreno firme de la LAV Madrid-Barcelona-Frontera francesa

4.1.1.2. VÍA SOBRE VIADUCTO.



Esquema 4.3: Sección tipo de vía doble sobre viaducto de la LAV Madrid- Barcelona- Frontera francesa

4.1.1.3. ESQUEMA DE LOS RAILES.

El esquema a simular de los raíles merece capítulo aparte. Se ha considerado que la correcta simulación de los raíles es importante para luego poder tener en cuenta los efectos del viento, ya que la ausencia de estos en la simulación puede tener una gran relevancia en los datos obtenidos, sobre todo en lo que se refiere al coeficiente de sustentación.

Para ello es importante, al igual que antes, crear modelos parecidos a los reales. Los trazados en las líneas de alta velocidad requieren unas condiciones especiales, como rieles de al menos 60 kg/m (UIC 60) para evitar deformaciones.

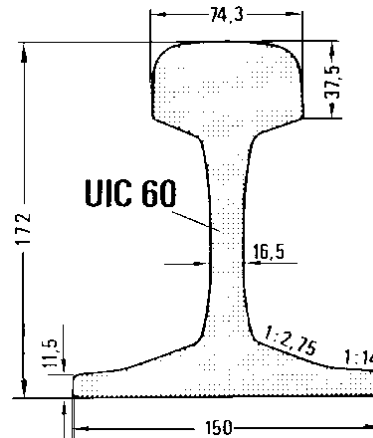


Imagen 4.2: Perfil de rail UIC 60. Fuente: Apuntes de Ferrocarriles.

En las líneas de alta velocidad de España, se emplea el perfil UIC 60 como el de la figura superior. De estos datos que aparecen en el esquema el modelo solo recogerá los valores más relevantes, es inútil simular un perfil perfecto, pero si al menos un perfil que tenga un orden de magnitud parecido al que se emplea en la realidad.

Con todos estos parámetros y medidas representadas en los esquemas se conformarán los correspondientes modelos de las infraestructuras en el programa de diseño gráfico.

4.2.- MATERIAL RODANTE.

El material rodante que va a ser estudiado es el que da servicio comercial de RENFE a la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona y que ya fue nombrado en el apartado “3.1.1 Explotaciones ferroviarias afectadas”. Son dos de los trenes de alta velocidad más importantes que se emplean actualmente en España:

Son los trenes de RENFE correspondientes a las series 102 y 103. Ambos son de segunda generación, es decir, que se han desarrollado desde los años noventa hasta ahora, y que han comenzado a operar en servicio regular a finales de la década pasada y en lo que llevamos de esta. Son capaces de superar el límite de velocidad comercial de 300km/h, alcanzando incluso los 350km/h.

Son estos dos trenes los que se estudiarán y a los que en adelante se hará referencia a ellos por su numeración RENFE, es decir serie 102 para el TALGO 350 y serie 103 para el Velaro E de SIEMENS y por su denominación comercial.

Dadas las características del proyecto, y que los análisis se realizan en dos dimensiones, de cada tren se necesitan dos bloques de datos; Por un lado la forma y dimensiones de su corte transversal, que será las que se empleen para crear los modelos que posteriormente se simularán en CFD, y de su vista lateral para poder estudiar su aerodinámica frente a vientos cruzados. Por otro lado será necesario conocer las características técnicas de cada tren, como son su potencia, peso, velocidad máxima, etc., para los análisis dinámicos.

Además de esto se hará una breve introducción de cada uno de los trenes para situar al lector, y hacerle una idea del por qué de sus características y diseño. Hay que destacar que la obtención de estos datos es una labor complicada ya que habitualmente son confidenciales de cada marca.

4.2.1.- DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DE LA SERIE 102 DE RENFE.

Los TALGO 350 son trenes aerodinámicos, ligeros y de bajo consumo que conforman las series 102 de RENFE y la futura 112. Suponen la entrada en escena de la empresa española en el segmento de la Alta Velocidad, aunque en este caso en asociación con Bombardier.

El serie 102 de RENFE se trata de un vehículo desarrollado por el consorcio de TALGO y Bombardier Transportation y es capaz de desarrollar velocidades máximas cercanas a los 350km/h.

La primera unidad preserie del TALGO 350 comenzó los ensayos en Octubre de 2000, alcanzando el 24 de febrero de 2001 la velocidad máxima de 359km/h en perfectas condiciones de seguridad y estabilidad, incluso con fuertes vientos laterales, dato este que es muy relevante para este proyecto.



Imagen 4.3: Frontal del TALGO 350 con los colores de RENFE.

4.2.1.2. DISEÑO Y MEDIDAS EXTERIORES DEL SERIE 102.

Como se aprecia en la imagen 4.3, las cabezas motrices del TALGO disponen de un frontal aerodinámico optimizado para soportar las ondas de presión y el viento lateral. Debido a esta forma aerodinámica del frontal este tren ha recibido el sobrenombre de Pato.

Los coches del TALGO 350 son una evolución del TALGO VII con los que comparten las dimensiones externas. Como otros trenes de la misma casa, las cajas están construidas con materiales ligeros, extrusiones soldadas de aleación de aluminio, lo que ofrece menor peso por plaza que redunda en un bajo consumo energético y en un menor coste de mantenimiento de vía y material.

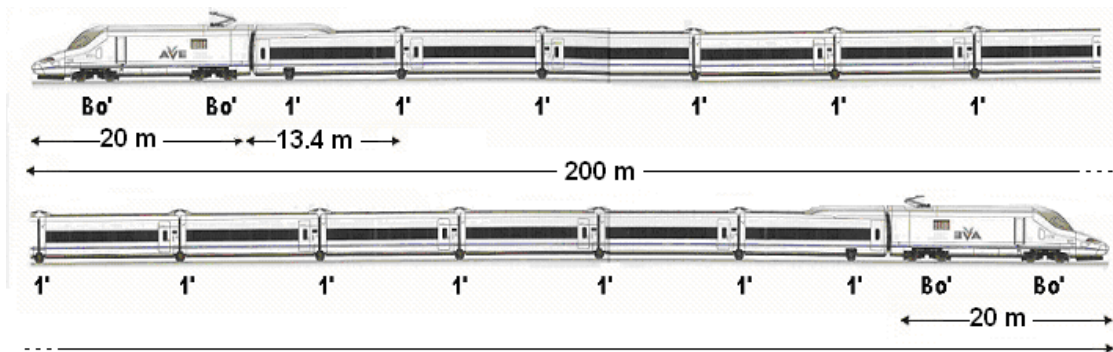


Imagen 4.4: Detalle del lateral del TALGO 350. Fuente: TALGO.

La longitud total del tren es de 200 metros con una longitud de los coches intermedios de 13,4 metros y una altura del piso sobre el carril de 756 milímetros. La anchura de los coches es de 2.942 mm y la altura de 3.365. La cabeza tractora

tiene una longitud de 20 metros, una anchura máxima de 2,96 y una altura de 4 metros. El centro de gravedad de la composición es muy bajo lo que mejora su estabilidad de marcha.

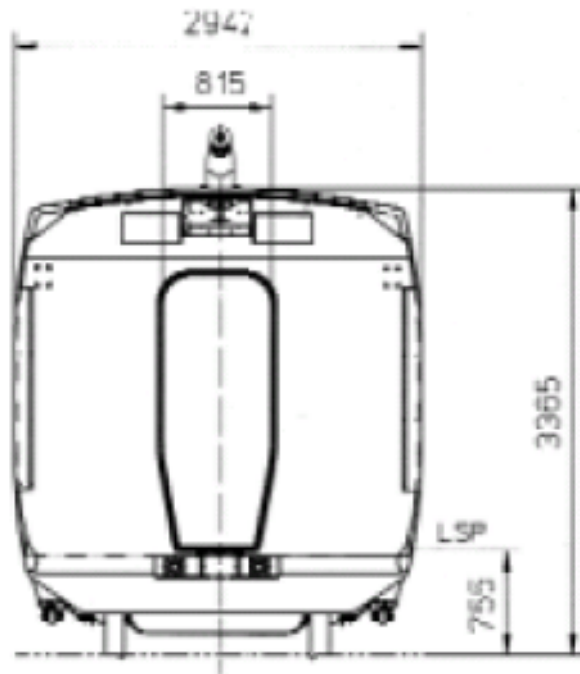


Imagen 4.5: Esquema acotado de la sección transversal del TALGO 350 (de un vagón, la máquina es similar en cuanto a forma pero de 4m de altura). Fuente: TALGO.

Esta última imagen será la que se emplee para introducirla en nuestro modelo a simular. Corresponde a la sección de un vagón, que son más bajos que los tractores como se aprecia en la imagen 4.4.

El simular una sección de un vagón tiene el inconveniente de que no se está simulando la condición más desfavorable, ya que a más altura del tren peor será la influencia del viento lateral. Pero la simulación de esta sección, aún conociendo que no es la más desfavorable, tiene dos motivaciones:

- La longitud de tren con esta sección es 4 veces mayor que la longitud de tractoras, por tanto se puede considerar que es más representativa del modelo de tren.
- Además el otro tren que se va a estudiar tiene una sección uniforme en toda su longitud más alta que la del vagón que se acaba de definir. Por tanto se manejarán así dos modelos de trenes con diferentes alturas lo que permitirá recabar información sobre la influencia de ésta en la estabilidad frente a vientos laterales.

tractoras, sino que van colocados a lo largo del tren, lo que unido a su ligereza le permite un peso de algo más de 16t/eje.

Esta serie es un hermano del Velaro, es igual en el diseño pero con características especiales solicitadas por RENFE como un funcionamiento en un rango de temperaturas mayor y una mayor potencia, 8.800 kW para poder recorrer los 600km que separan Barcelona y Madrid por el corredor noreste de alta velocidad en 2h30m.



Imagen 4.6: Frontal del Velaro con los colores de RENFE. Fuente: SIEMENS

Cabe destacar que este tren posee el récord mundial de velocidad para un tren de serie. Durante las pruebas de homologación, la noche del 15 al 16 de julio de 2006, en un tramo de la LAV cercano a Guadalajara, la unidad 02 alcanzó la máxima velocidad obtenida por un tren en España y la que estableció el record antes citado: 403,7km/h.

4.2.2.1. DISEÑO Y MEDIDAS EXTERIORES DEL SERIE 103.

El de SIEMENS es un tren que destaca por sus líneas aerodinámicas, con un frontal puntiagudo que recuerda a los trenes japoneses, y con unas líneas suaves y redondeadas. Es completamente diferente en cuanto a su diseño al TALGO 350, y es por ello que el estudio de estos dos trenes puede ser muy interesante de cara a los objetivos del proyecto, ya que se podrán comparar dos trenes morfológicamente diferentes.

La configuración típica del ICE-3 y del Velaro E consiste en 8 coches, 4 de ellos con tracción.

En el caso del Velaro E los planos de la sección son confidenciales y no se pueden publicar en este estudio, por lo que presentamos la imagen inferior de una foto frontal para dar una idea de su sección transversal.

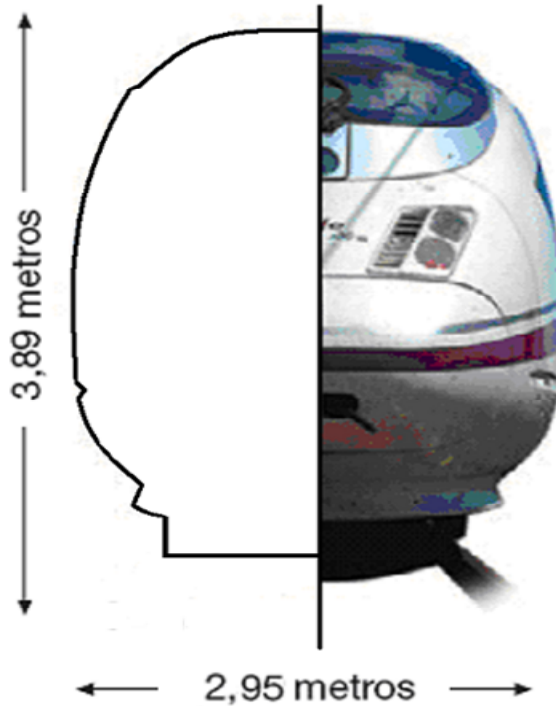


Imagen 4.7: Esquema acotado de la sección transversal del SIEMENS S-103. Elaboración propia.

4.2.2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SERIE 103.

La Serie 103 de RENFE es uno de los trenes más avanzados del mundo y el más rápido sobre raíles en cuanto a velocidad en explotación comercial. Es un tren con tracción distribuida, lo que significa que tiene bogies con tracción repartidos por todo el tren, consiguiendo de este modo un mejor aprovechamiento del espacio del tren al no tener que tener 2 cabezas tractoras como las serie 102 comentada antes, mejor aprovechamiento de la energía y mayor aceleración.

Cada tren es una unidad de ocho coches de viajeros con tracción distribuida. Al carecer de cabezas tractoras, todo el equipo eléctrico va distribuido a lo largo del tren, con el 50 % de los bogies motorizados. Los coches 1, 3, 6 y 8 cuentan con dos bogies motorizados y éstos con dos motores situados en el bastidor de 550 kW de potencia cada uno.

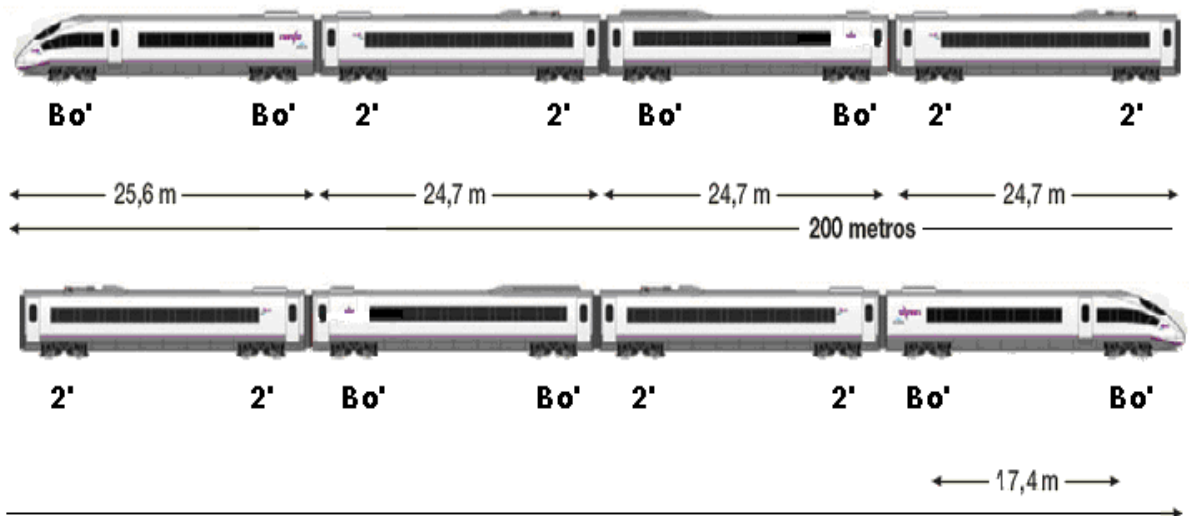


Imagen 4.8: Detalle de la vista lateral acotada del SIEMENS S- 103 en su configuración simple. Fuente: SIEMENS

La siguiente tabla recoge las características técnicas más relevantes de este tren, que se emplearán para los análisis dinámicos posteriores.

Tipo de vehículo:	Tren de alta velocidad	Distancia entre topes:	200,84 m
Fabricante:	SIEMENS	Anchura máxima:	2,95 m
Año de recepción:	2005- 2007	Altura máxima:	3,89 m
Potencia:	8.800 kW	Ancho de vía:	1435 mm
Velocidad máxima:	350 km/h	Disposición ejes:	Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'+2'2'+2'2'+Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'
Esfuerzo tractor:	283 kN al arranque 850 kN a Vmax	Peso en servicio:	425 t (vacío) y 465 t (100%)
Número de motores:	16 de 550kW	Peso por eje:	16.79 t

Tabla 4.2: Características técnicas del AVE Serie 103. Fuente: RENFE.

4.3.- CONFIGURACIÓN DE LAS BARRERAS PARAVIENTO.

Una de las medidas de mitigación más importantes que se van a proponer en este proyecto son los parapetos, pantallas o barreras para-viento instalados a los lados de la vía.

Este apartado tiene como objetivo fijar todos los parámetros que las definan, de manera que algunos de ellos constituyan variables de la simulación

(como por ejemplo la altura) y otros queden más o menos fijados (como los posibles emplazamientos).

Primero habrá que definir sus posibles localizaciones dentro de la infraestructura de la vía, de manera que no afecten negativamente al servicio ni a su mantenimiento. Es importante definir primero este término ya que puede condicionar el aspecto geométrico de las barreras.

A continuación se definirán los posibles parámetros geométricos, altura, forma y espesor que vendrán a definir los aspectos viables de las barreras.

4.3.1.- EMPLAZAMIENTO DE LA BARRERA EN LA VÍA.

Cuando se haga referencia a la localización o emplazamiento de la barrera en la vía, se está indicando el lugar en el plano bidimensional en el que se tiene que colocar esta barrera.

Estas barreras deben respetar el gálibo cinemático que marca la legislación vigente y las normas UNE. Hay que tener en cuenta que la infraestructura debe construirse de manera que haya una distancia que permita el paso con toda seguridad de los trenes que cumplan la ETI de material rodante del ferrocarril de alta velocidad.

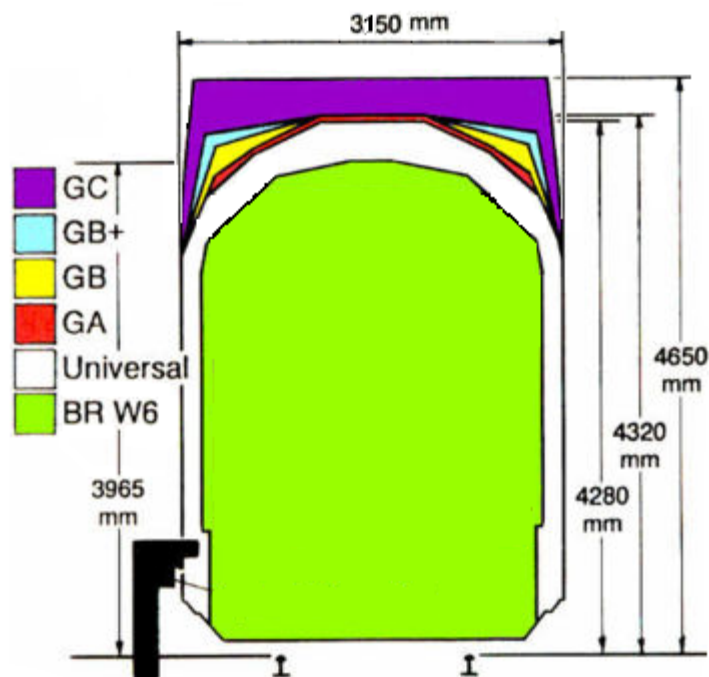


Imagen 4.9: Gálibo UIC. Fuente: <http://www.crowsnest.co.uk/>

En la imagen superior aparece el gálibo internacional que marca la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles). Como se puede observar el ancho es fijo para los distintos tipos de gálibos fijados, y esta es la única medida que interesa de cara a este proyecto.

Además hay que tener en cuenta que los trenes de alta velocidad producen a su paso grandes perturbaciones en el aire, por eso la ETI de material rodante de la legislación europea recomienda que las instalaciones eléctricas y los equipos de señalización se sitúen a más de dos metros del eje de la vía por cada lado.

El esquema de vía no es el mismo cuando la vía está sobre un viaducto que cuando está sentada sobre un terraplén en terreno firme. Por tanto las alternativas de emplazamiento de las barreras tampoco pueden ser las mismas. A continuación se proponen alternativas de localización de las barreras para las dos situaciones comentadas, comenzando por la vía en terraplén sobre terreno firme que es más común en los trazados.

LOCALIZACIÓN DE LA BARRERA EN VÍA SOBRE TERRAPLÉN.

Partiendo de que cuanto más cerca se sitúe la barrera del tren mejor, no se podrá colocar la barrera por delante de los postes de la catenaria (mirando desde la vía del tren). Esto se debe a dos principales motivos:

- El terreno que va desde los 2m entre eje de la vía que establece la recomendación europea hasta el eje del poste de la catenaria (3,35m del eje de la vía) está en pendiente y sería complicado instalar la cimentación de la barrera en una obra ya existente sin provocar deslizamientos del balasto sobre el que se asientan las vías.
- Además en el poste de la catenaria se suelen situar señales, y si se colocase la barrera delante el conductor del tren no podría verlas, a no ser que estas fueran muy bajas, y entonces su efecto podría ser despreciable.

Después de analizar tramos de vía en fotos y en situ, se puede concluir que las zonas óptimas para situar la barrera en vía en terreno firme son las que se presentan en la siguiente figura circunscritas en rojo.

Dentro de estas zonas se proponen tres posibles emplazamientos, enumerados de más cerca de la vía a más lejos, E1, E2 y E3.

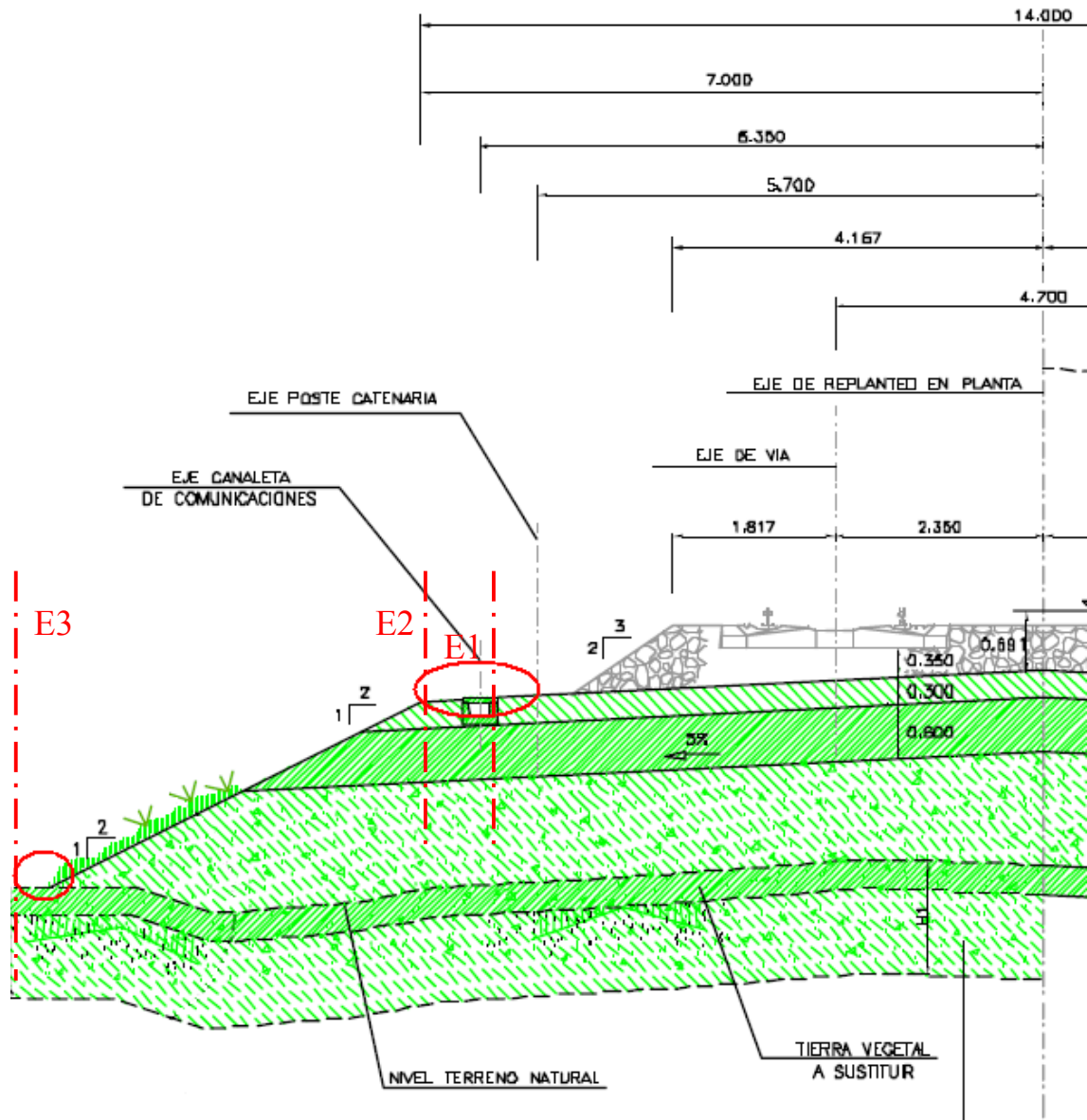


Imagen 4.10: Posibles emplazamientos de las barreras para-viento en estructura de vía sobre terraplén.

Serán los análisis preliminares los que determinen cuál es la mejor posición en cuanto a aerodinámica para la barrera. Pero se deben tener en cuenta otras consideraciones como su montaje, perjuicios sobre el servicio, mantenimiento de la vía, etc. Cada posición para la barrera tiene sus ventajas y desventajas desde los distintos puntos de vista examinados:

- E1: Este emplazamiento es el más cercano a la vía que es lo más deseable, pero en cambio no se podría fijar al suelo correctamente, ya que habrá que dejar huecos inferiores para los cables que vayan a la canaleta de comunicaciones. Además el espacio de trabajo para su instalación quedaría muy limitado, se dispondría de poco más de medio metro para trabajar en su instalación.
- E2: Esta posición no dista mucho de la anterior y permite respetar el entorno de la infraestructura de la vía sin alterar su configuración de cableados. Es por tanto mejor solución desde el punto de vista de no alterar la estructura de vía existente, uno de los objetivos planteados.
- E3: Es la mejor solución desde el punto de vista de la instalación y obra civil. Al encontrarse más alejada, ni siquiera su montaje interferiría en el servicio de trenes. El inconveniente es que al alejarse también pierde altura sobre el nivel de la vía, con lo que se necesitarían barreras mucho más altas para producir los mismos efectos, y esto conlleva mayores costes de material.

Teniendo en cuenta estas observaciones de cara a los estudios preliminares se plantearán solo dos posibles soluciones, la E2 y la E3, y se compararán sus efectos en cada una de las dos posiciones.

No se harán estudios con el emplazamiento E1 ya que los datos que se obtendrán no serán muy diferentes a los de E2, y además la instalación de barreras en este punto, aún siendo viable, es la más compleja desde el punto de vista técnico.

LOCALIZACIÓN DE LA BARRERA EN VIADUCTO.

La disposición de la vía en viaducto es mucho más restrictiva y por tanto la localización de la barrera no admite discusión, ya que solo hay un emplazamiento posible y este es sustituyendo a la barrera o barandilla de seguridad que se instala a ambos lados del viaducto por la barrera para-viento.

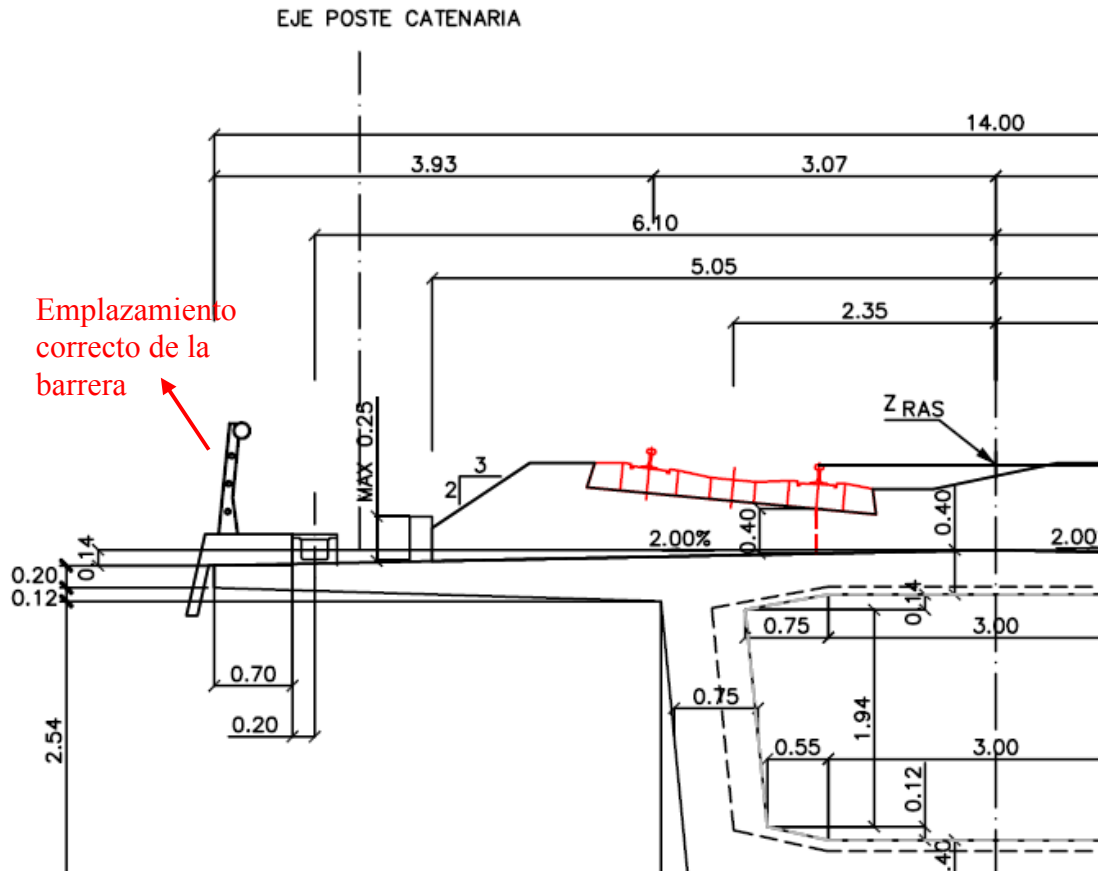


Imagen 4.11: Posible emplazamiento de la barrera para-viento en estructura de vía sobre viaducto.

No se pueden colocar delante de este punto por motivos de seguridad, ya que según marcas las normas citadas hay que dejar un pasillo de evacuación accesible, que es el formado por el espacio que va de la canaleta de comunicaciones a la barandilla de seguridad.

Por tanto el lugar señalado en rojo en la figura es en el que se colocarán las barreras cuando se hagan los estudios sobre vía en viaducto, y no se puede contemplar otro. En este caso la posición no es tan crucial ya que al alejarse de la vía del tren no se pierde altura, como pasa en vía sobre terraplén en terreno firme.

Además la barrera sobre viaducto es recomendable que sea transparente, para que el pasajero pueda apreciar las vistas, ya que estos lugares generalmente tienen interés paisajístico.

4.3.2.- PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE DEFINEN LAS BARRERAS.

Cada barrera vendrá caracterizada por cuatro parámetros que caracterizaran su forma. En base a los estudios recogidos en el estado del arte, y

a las características de las barreras comerciales que se instalan actualmente en vías de comunicación, para la forma de la barrera se apuesta por tres formatos que quedan determinados con estos parámetros definidos en la siguiente figura.

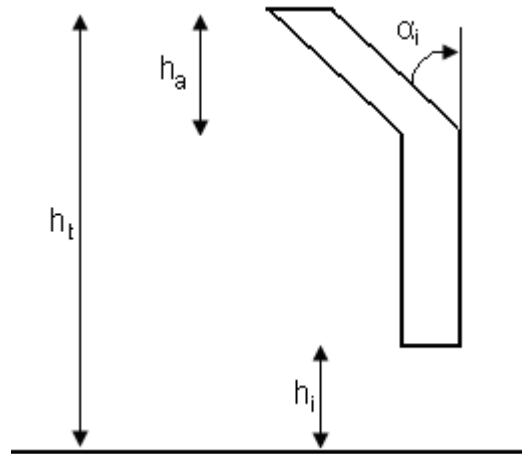


Imagen 4.12: Definición de las variables que definen la barrera para-viento.

- h_t : Altura total de la barrera.
- h_i : Altura del hueco inferior de la barrera.
- h_a : Longitud superior inclinada de la barrera
- α_i : Ángulo de inclinación de la barrera.

En función de los valores que adopten estos parámetros se pueden clasificar las barreras en diferentes tipos para hacer referencia a ellas a la hora de evaluarlas:

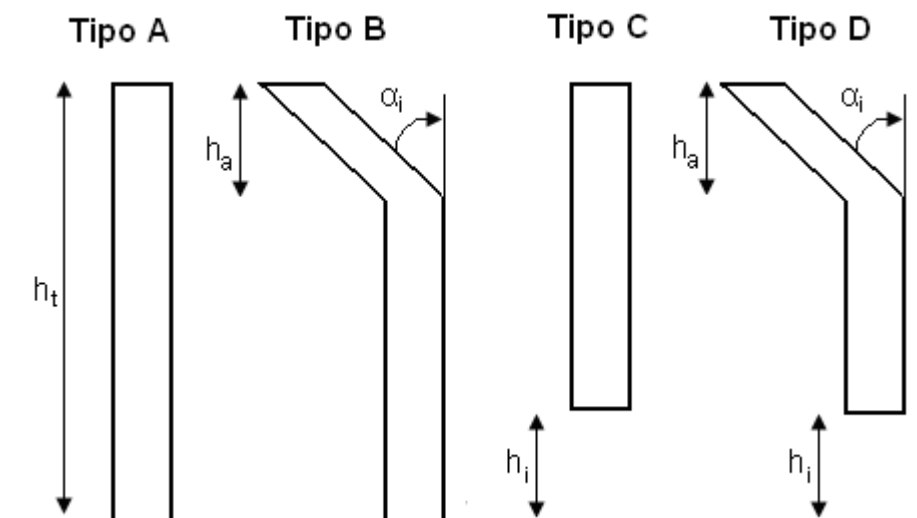


Imagen 4.13: Tipos de barreras para-viento.

- Tipo A: Barrera clásica, es la que normalmente ofertan las empresas comerciales especializadas.
- Tipo B: Barrera con un deflector para levantar más la estela del flujo.
- Tipo C: Barrera con un hueco inferior que puede ayudar a homogeneizar el flujo y aumentar la sustentación
- Tipo D: Barrera a partir de C y B.

Estas barreras propuestas podrán sufrir las modificaciones que se crean necesarias en función de los parámetros obtenidos en los estudios preliminares, pero en principio serán estas cuatro las que se estudiarán.

5. MODELOS Y ESCENARIOS

CAPÍTULO 5: MODELOS Y ESCENARIOS.

En este capítulo se van a plantear los diferentes modelos que se han construido a partir de los parámetros aportados en el capítulo anterior. Su contenido se fundamenta en la descripción estos modelos a ensayar en las diferentes infraestructuras descritas, con el material rodante definido y en base a los parámetros fijados.

Comienza con una descripción del marco donde se desarrollan los ensayos, en la que se recoge una vista general del entorno del problema y del dominio computacional, su planteamiento fundamental, las condiciones de contorno que delimitan el problema y los principales factores que definen estas condiciones.

A continuación se presentan los modelos de las infraestructuras que se han desarrollado a partir de los esquemas de los que se dispone y que fueron ya expuestos. Igualmente se justifican las simplificaciones realizadas en estos modelos considerando que su fin es simularlos en un programa de CFD.

El siguiente apartado recoge los modelos del material rodante propuestos anteriormente, y explica el proceso de elaboración de estos modelos.

Por último se describen y justifican los ensayos que se van a llevar a cabo, explicando el porque de su planteamiento y los parámetros que se van a considerar junto con los objetivos generales que se pretenden obtener con cada uno de ellos.

5.1.- MARCO GENERAL DE LOS ENSAYOS.

Este apartado expone las condiciones que definen el problema, o lo que es lo mismo, el planteamiento general de los modelos que se van a resolver. El planteamiento particular de cada modelo se hará cuando se describan los ensayos y análisis que se van a realizar.

Para plantear este marco general se parte de los parámetros fijados en el anterior capítulo, y de las ecuaciones que rigen el movimiento del aire y la dinámica del tren ya definidas en el acercamiento teórico (Apartado 3.2).

Los análisis que se van a plantear en este proyecto son bidimensionales, es decir, se evaluarán las medidas de mitigación del viento lateral por medio de análisis en el plano perpendicular a la dirección del tren.

El planteamiento del problema como un análisis bidimensional se fundamenta en el hecho de que lo que se pretende es una comparación de medidas de mitigación de los efectos del viento lateral, y no un acercamiento a la dinámica del tren frente a estos vientos. Por ello, es suficiente el empleo de un análisis bidimensional para tal fin.

En base a esto, los modelos se plantean en un dominio esquemático como el que se muestra en la siguiente figura.

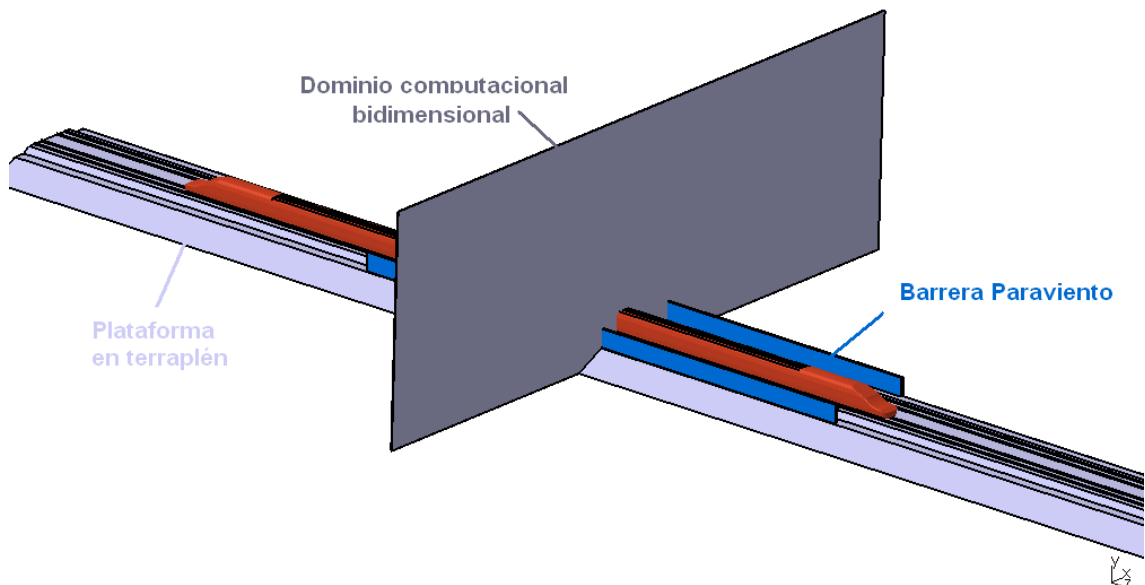


Imagen 5.1: Vista esquemática del dominio computacional en el que se desarrolla el problema.

El dominio en el que se establecerán los análisis es un cuadrilátero de 300m de ancho y 70m de alto que representa el corte transversal de la vía y sus alrededores. La figura inferior muestra el dominio computacional y las principales condiciones de contorno que lo definen.

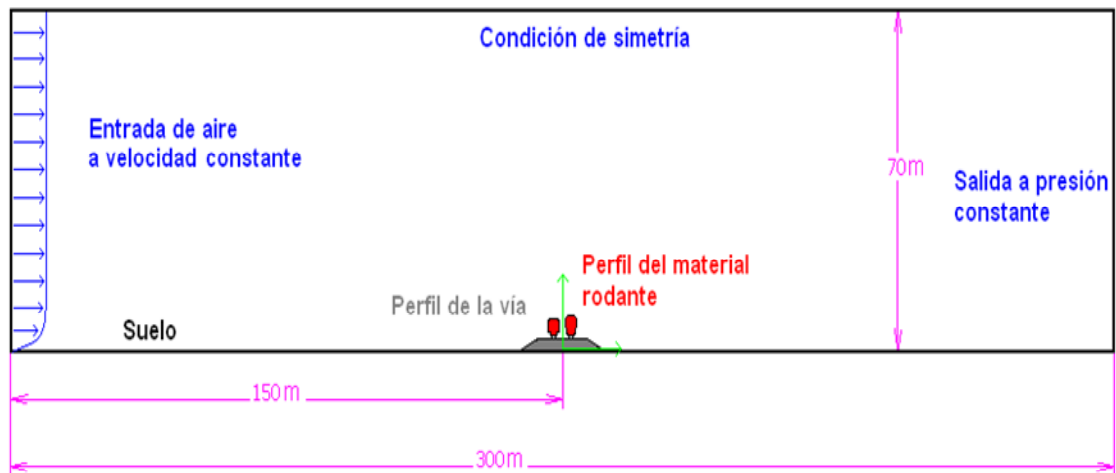


Imagen 5.2: Esquema genérico del dominio computacional y las condiciones de contorno para la configuración en terraplén.

Estos límites están establecidos para que el flujo incidente no se encuentre perturbado en las fronteras del dominio, y de esta forma poder establecer unas condiciones de contorno constantes en la simulación. De esta manera se dispone de un dominio lo suficientemente grande como para suponer que existen zonas donde el flujo no se ve perturbado por los obstáculos.

De momento se definen las condiciones de contorno que gobiernan el problema de manera general, luego cuando se planteen los diferentes análisis se definirán los valores y las especificaciones concretas de cada una de ellas.

Condiciones a la entrada

La línea vertical de la izquierda del dominio es lo que se ha denominado entrada. En ella se considerará un flujo de aire entrante de velocidad constante en toda la longitud de esta. Es lo que se hace en los análisis en túnel de viento que se pretenden simular.

El aire entra a una velocidad dada simulando una racha de viento, que en los primeros metros solo se ve perturbada por el efecto del rozamiento del suelo. Esta velocidad en el borde será uno de los parámetros que se fijarán en los análisis.

El programa también permite fijar otros parámetros como la dirección, y los valores que definen la turbulencia del flujo entrante. Tanto estos valores como el de la velocidad antes citada se definirán para cada tipo de análisis y ensayos.

Condiciones a la salida.

La línea vertical de la derecha es lo que se ha definido como salida. En ella se fijará una presión estática constante e igual a la atmosférica en el campo lejano. Como lejos de los obstáculos el flujo se supone no estará perturbado, se fija ésta condición que permanece constante.

En el caso de que los obstáculos perturbaran el flujo hasta las fronteras del dominio, el problema sería no convergente, ya que la presión atmosférica a la salida es una condición prefijada antes de la simulación. Si esto fuera así deberían plantearse cambios en el modelo de turbulencia o aumentar las dimensiones del dominio computacional.

Esta presión es común a todos los ensayos que se realicen y se tomará como valor el de la presión atmosférica media a nivel del mar en unidades internacionales, que es de 101.325 N/m^2 ó Pa.

Condiciones de pared.

La condición de contorno pared establece que el aire no puede atravesarla. Además el flujo en ellas se ve frenado por la influencia del rozamiento de estas paredes definido por su rugosidad.

Esta condición de contorno se define para el suelo, el perfil de la vía, el del tren y las barreras laterales. Como el problema se resuelve desde una perspectiva bidimensional todas estas paredes permanecen estáticas en el modelo planteado.

Para cada superficie se definen unos valores de rugosidad coherente con las condiciones específicas de superficie de ésta, y conforme a los que marca la Especificación Técnica de Interoperabilidad (24) en su anexo G.

- Para el suelo se define una altura de rugosidad de 4cm.
- Para el perfil de la vía en terraplén se fija una rugosidad de 4cm también, acorde con los materiales que lo conforman, sobre todo capas de balasto y subbalasto.
- Para el perfil de la vía en viaducto se fija una rugosidad de 1cm, conforme a la del hormigón que constituye la mayor parte de la estructura.

- Para el caso de las paredes del tren, de superficies muy lisas, se fija una rugosidad muy inferior a las anteriores, de una décima de milímetro.
- Como el fenómeno de fricción en las paredes no es relevante para este estudio dado su longitud y disposición, se obviará que esta rugosidad depende del tipo de material del que esté formada la barrera, y por ello se supondrá una rugosidad media de 1mm. Esta simplificación se justifica en el hecho de que plantear un problema diferente para cada material aumentaría el número de ensayos, y las diferencias no serían apreciables ya que la influencia de la rugosidad frente al efecto para-viento de la barrera es despreciable.

Condiciones en la parte superior.

En la línea horizontal superior se fija lo que en el programa de CFD FLUENT se define como una condición de simetría. Es una condición parecida a la de la pared, en cuanto a que no deja pasar el flujo a su través, pero con la diferencia de que no tiene rozamiento.

Se puede afirmar que esta condición viene a definir que el flujo infinitamente cercano tanto por arriba como por abajo de esta línea sería hipotéticamente igual en caso de que se simulase el entorno superior.

Condiciones del fluido.

El fluido obviamente es el aire, pero también se hace necesario fijar algunos de los parámetros que van a definir su comportamiento en el ensayo. Como ya se ha justificado se empleará un modelo donde el aire se considera incomprensible, que es correcto para las velocidades de ráfaga que se van a manejar.

Las características que se deben fijar del aire son la densidad y la viscosidad. En nuestro caso se van a considerar condiciones normales al nivel de mar, es decir valores normalizados para una temperatura de 288k y una presión de 1atm:

- Densidad: 1,225 kg/m³
- Viscosidad: 1,7894e-05 Ns/ m²

5.2.- MODELOS DE LAS INFRAESTRUCTURAS.

Para la elaboración de los modelos de las infraestructuras se parte de los parámetros descritos en el capítulo 4 en el apartado relativo a las infraestructuras.

A partir de los esquemas de vías y de raíles que hay recogidos en dicho apartado se han generado, empleando los programas de diseño gráfico tipo CAD, los esquemas modelo que se implementarán en el programa de CFD.

Para su realización se ha empleado el programa de diseño gráfico CATIA, y con los modelos ya definidos se han traspasado estos diseños al programa GAMBIT con el que posteriormente se realizarán los mallados.

A la hora de realizar los diseños hay que tener en cuenta que van a ser mallados primero, y simulados después en un programa de CFD, y por tanto hay que definir los detalles justos para poder hacer un modelo completo pero no excesivamente complejo.

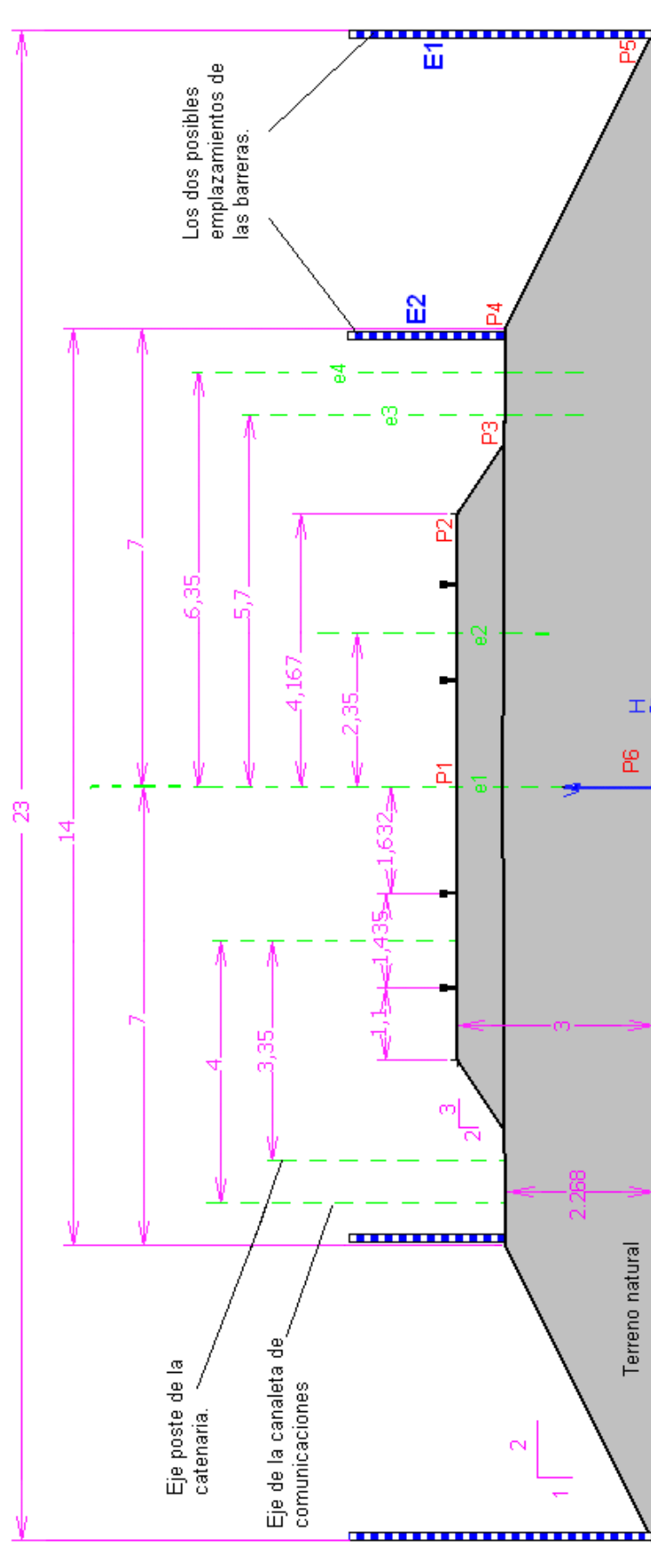
Hay que prestar especial atención a los pequeños detalles que sean de poca importancia a la hora de simular el modelo fluido-dinámico, ya que pueden provocar mallados irregulares que a la larga resultan perjudiciales para la simulación, como recomiendan los manuales de CFD.

5.2.1.- MODELO DE VÍA SOBRE TERRAPLÉN EN TERRENO FIRME.

Observando detenidamente los planos de los esquemas 4.1 y 4.2 correspondientes a las secciones tipo sobre terraplén de diferentes tramos de la LAV Madrid- Barcelona, se puede ver que ambos poseen las mismas medidas de plataforma, con la misma anchura, distancia entre vías, el poste de la catenaria se coloca a la misma distancia, las mismas pendientes para las torrenteras, etc.

Por este motivo lo que se ha hecho ha sido crear una sección tipo de elaboración propia, con aquellas medidas que van a ser útiles en este estudio, y desechando aquellas que no lo son, como espesores de balasto, subbalasto, capas de forma, etc.

Es en esta sección tipo sobre la que posteriormente se dibujará la malla empleando GAMBIT, para más tarde simularla en CFD. Se muestra dicha sección en el siguiente esquema.



Esquema 5.1: Sección tipo de vía doble en terraplén sobre terreno firme a simular en los modelos de CFD (Cotas en metros).

Para modelar esta sección se ha informatizado el esquema anterior, con el programa CATIA, obteniendo las coordenadas de los puntos (dibujados en rojo) y de los ejes (en verde). Se han obtenido solo la mitad de los puntos y ejes, y el resto del esquema se define por simetría.

Puntos	X	Y
1	0,00	3,000
2	4,17	3,000
3	5,25	2,278
4	7,00	2,268
5	11,54	0,000
6	0,00	0,000

Eje	X	Nombre
1	0,00	Eje de la infraestructura
2	2,35	Eje de la vía
3	5,70	Eje del poste de la catenaria
4	6,35	Eje de la canaleta de comunicaciones

Tabla 5.1: Coordenadas en metros de los puntos que definen la sección de vía en terraplén.

Estos puntos con sus correspondientes coordenadas en metros, son introducidos en el programa GAMBIT (programa de diseño asociado a FLUENT), y definen la sección de la vía en terraplén que se simulará.

Además en el esquema aparecen representadas como franjas azules y blancas los dos posibles emplazamientos de las barreras que ya fueron citados anteriormente, o en el P4 (emplazamiento E2) o en el P5 (Emplazamiento E1) y sus correspondientes simétricos al otro lado.

5.2.2.- MODELO DE VÍA SOBRE VIADUCTO.

Para el caso de los viaductos se simularán los perfiles de los esquemas 4.3 y 4.4 presentados en el anterior capítulo. En este caso la simulación correcta del perfil puede resultar algo más compleja, ya que hay diversos tipos de plataformas para viaductos, parecidas entre sí, pero no exactamente iguales.

Aún así como el objetivo de este proyecto es comparar la influencia de distintos tipos de pantallas y de la forma de los trenes, se considera que lo mejor es centrarse en un perfil de viaducto típico partiendo de los ejemplos presentados anteriormente. De esta forma lo que se consigue es simular, al igual que antes, modelos lo más generales posible.

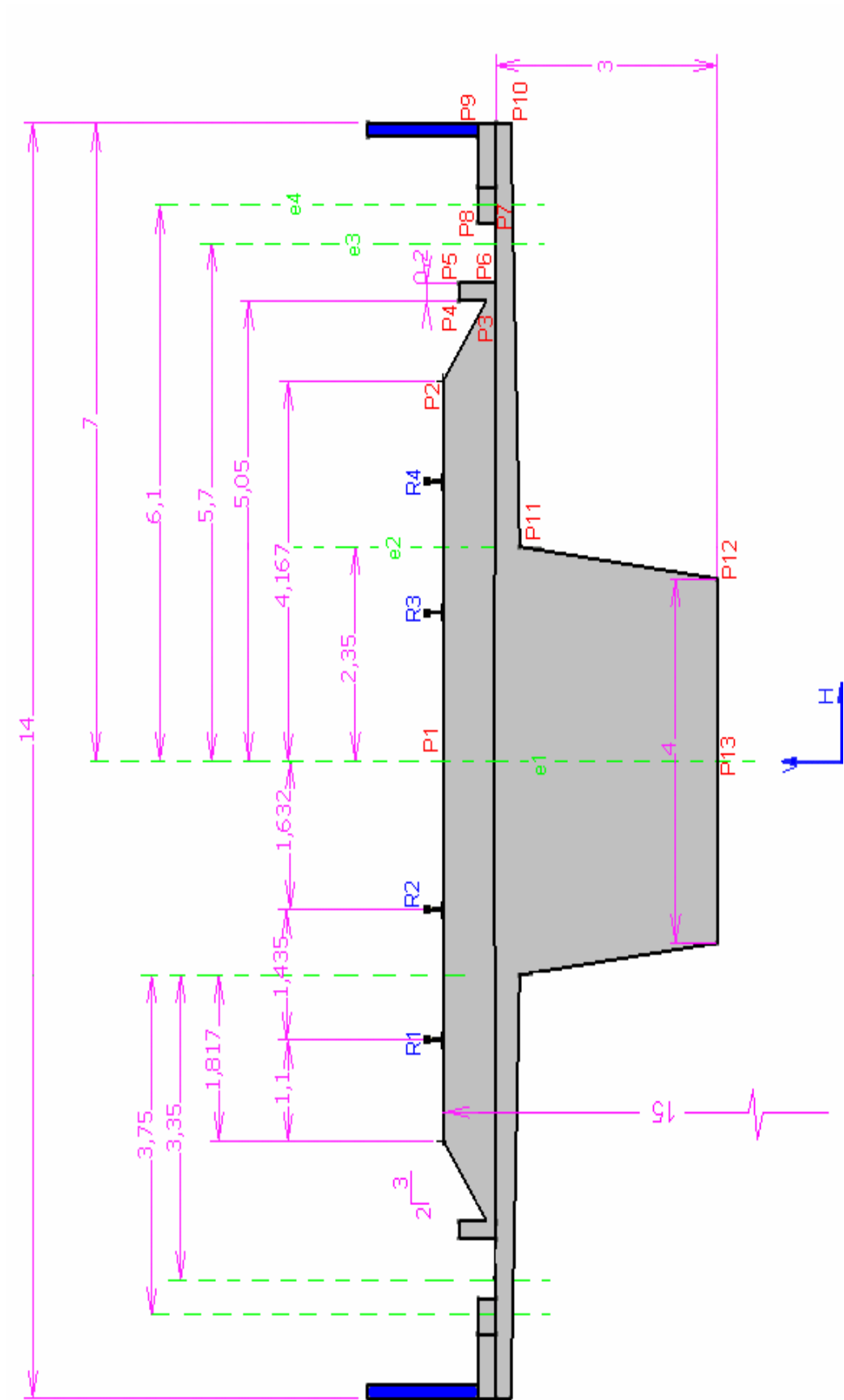
El modelo sobre viaducto es muy parecido al modelo sobre terraplén, pero hay que simular la parte baja de la plancha del viaducto y dejar un hueco en la parte inferior del modelo por el que pueda circular el aire sin perturbaciones. De esta forma se pueden simular las condiciones de aire en el viaducto.

Los primeros estudios preliminares, así como el estado del arte muestran que una altura de 15 metros, desde la superficie de rodadura al suelo, es suficiente para simular un flujo típico de la zona media del viaducto, que tiene algunas características que lo hacen diferente al flujo al nivel del suelo.

El hecho de marchar sobre viaductos agrava los problemas de los vientos laterales, porque normalmente las ráfagas de viento son más intensas, dado que la velocidad en la capa límite atmosférica crece al aumentar la altura.

Además hay que tener en cuenta que al nivel del terreno hay innumerables elementos, como pueden ser la vegetación o la orografía y rugosidad del terreno, que pueden disminuir el efecto del viento al disminuir la velocidad de este.

En el siguiente esquema se puede observar el perfil tipo de viaducto que se ha desarrollado para poder usarlo como escenario en las simulaciones de los diferentes ensayos y análisis sobre esta superficie.



Esquema 5.2: Sección tipo de vía doble sobre viaducto a simular en los modelos de CFD (Cotas en metros).

Al igual que con el modelo en terraplén, para modelar esta sección se ha informatizado el esquema obteniéndose las coordenadas de los puntos (en rojo) y de los ejes (en verde). Solo se han obtenido la mitad de los puntos y ejes, y el resto del esquema se define por simetría.

Puntos	X	Y
1	0,00	15,000
2	4,17	15,000
3	5,05	14,411
4	5,05	14,779
5	5,25	14,779
6	5,25	14,279
7	5,90	14,279
8	5,90	14,529
9	7,00	14,529
10	7,00	14,079
11	2,35	13,959
12	2,00	11,280
13	0,00	11,280

Eje	X	Nombre
1	0	Eje de la infraestructura
2	2,35	Eje de la vía
3	5,7	Eje del poste de la catenaria
4	6,35	Eje de la canaleta de comunicaciones

Tabla 5.2: Coordenadas en metros de los puntos que definen la sección de vía en viaducto

En el caso del viaducto, como ya se explicó, solo existe un emplazamiento posible para las barreras laterales, y es el que aparece en el esquema representado por una barra azul a ambos lados de la vía.

5.2.3.- MODELO DE LOS RAÍLES

El modelado de los raíles es importante para poder tener en cuenta de la mejor manera posible los efectos del aire que pasa por debajo del tren provocando la sustentación.

En las líneas de alta velocidad de España, se emplea el perfil UIC 60 como el que se recogía en la imagen 4.2. De estos datos, que aparecen en el esquema, el modelo solo recogerá los valores más relevantes, ya que es inútil simular un perfil perfecto, pero si al menos un perfil que tenga un orden de magnitud parecido al que se emplea en la realidad con el objetivo, como ya se explicó de simular el flujo bajo el tren de la manera más exacta posible.

Con este fin se diseña con la ayuda de CATIA un riel de formas cuadradas pero con igual orden de magnitud, como el que aparece en la figura siguiente acotada.

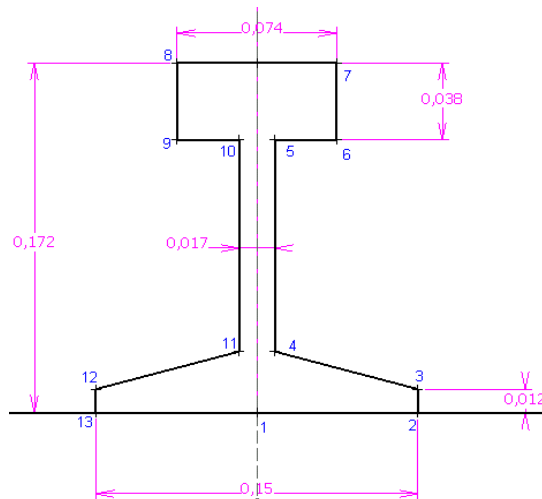


Imagen 5.3: Perfil del rail que se simulará (Cotas en metros).

Los números en azul marcan cada uno de los vértices del perfil. Para cada uno de estos puntos se obtuvieron sus coordenadas en el esquema completo sobre terraplén, colocando cada perfil de vía en su lugar correspondiente dentro de la plataforma. Para cada uno de los cuatro rieles se dispone de 13 pares de coordenadas, que se exponen a continuación:

Riel 1	X	Y	Riel 2	X	Y	Riel 3	X	Y	Riel 4	X	Y
1	-3,067	3	1	-1,632	3	1	1,632	3	1	3,067	3
2	-2,992	3	2	-1,557	3	2	1,707	3	2	3,142	3
3	-2,992	3,011	3	-1,557	3,011	3	1,707	3,011	3	3,142	3,011
4	-3,059	3,03	4	-1,624	3,03	4	1,64	3,03	4	3,075	3,03
5	-3,059	3,134	5	-1,624	3,134	5	1,64	3,134	5	3,075	3,134
6	-3,03	3,134	6	-1,595	3,134	6	1,669	3,134	6	3,104	3,134
7	-3,03	3,172	7	-1,595	3,172	7	1,669	3,172	7	3,104	3,172
8	-3,104	3,172	8	-1,669	3,172	8	1,595	3,172	8	3,03	3,172
9	-3,104	3,134	9	-1,669	3,134	9	1,595	3,134	9	3,03	3,134
10	-3,075	3,134	10	-1,64	3,134	10	1,624	3,134	10	3,059	3,134
11	-3,075	3,03	11	-1,64	3,03	11	1,624	3,03	11	3,059	3,03
12	-3,142	3,011	12	-1,707	3,011	12	1,557	3,011	12	2,992	3,011
13	-3,142	3	13	-1,707	3	13	1,557	3	13	2,992	3

Tabla 5.3: Coordenadas en metros de los puntos que definen los rieles sobre vía en terraplén.

Con estas coordenadas se dibujan los perfiles de cada uno de los cuatro rieles en el programa GAMBIT, siendo el Riel 1 el más a barlovento, y así de izquierda a derecha hasta llegar al Riel 4, que es el que está situado más a sotavento. Estas coordenada son válidas para el esquema en terraplén, para el esquema en viaducto es necesario sumarle la diferencia de alturas de 12 metros a las coordenadas Y.

Se podrían redondear las esquinas de los raíles, pero no es recomendable, porque luego al realizar el mallado con GAMBIT, interesa que sea lo más simple y regular posible, y mallar sobre superficies curvas de tan pequeño tamaño acarrea problemas de interpolación que acaban por provocar irregularidades en la malla.

Este es un claro ejemplo de lo que se hacía referencia antes, simular estos pequeños detalles puede acarrear mallas complejas que acaban dando problemas de interpolación y por tanto de convergencia, haciendo las simulaciones más lentas o incluso no convergentes.

5.3.- MODELOS DEL MATERIAL RODANTE.

Para la elaboración de los modelos del material rodante, se parte de la imagen 4.6 para el serie 102 y de los planos confidenciales de los que disponemos del 103. Estos planos obtenidos son imágenes y no archivos de diseño gráfico por ordenador.

Los planos y cortes transversales solo muestran la forma del perfil y sus cotas más relevantes, pero es obvio que estas acotaciones no son suficientes para recrear el perfil en un programa de diseño como GAMBIT. Tampoco es posible conseguir, por la política de confidencialidad de las marcas, los planos perfectamente acotados de estos trenes en formato digital.

Ante la importancia de disponer de un modelo lo más similar posible al real se ha realizado un trabajo intenso de desarrollo, para a partir de las imágenes, obtener un perfil en el programa de diseño CATIA.

Para obtener estos perfiles se ha operado con un programa de dibujo que permite conocer las coordenadas de cada punto en una imagen correctamente dimensionada. A partir de estos valores, escalando y haciendo traslaciones se obtienen las coordenadas que se pueden introducir en CATIA primero y en GAMBIT posteriormente, para finalmente acabar simulándolos en FLUENT.

Con lo cual el proceso se traduce en obtener coordenadas en el programa de dibujo y hacerle las modificaciones necesarias para acoplarlas al sistema de coordenadas definido, teniendo en cuenta los valores de la plataforma que ya está diseñada y se presentaron en el punto anterior.

La introducción de los puntos en los programas de diseño, unido a las herramientas de interpolación permite obtener los perfiles ya en formato digital. Primero se pasan al programa CATIA, por que posee una interfaz más dinámica y permite hacer ligeros cambios e interpolaciones más eficaces, de manera que el perfil dibujado se adapte mejor a la forma real.

En la siguiente imagen se pueden ver los dos trenes tal y como se van a simular, el TALGO en la vía de barlovento y el SIEMENS en la de sotavento.

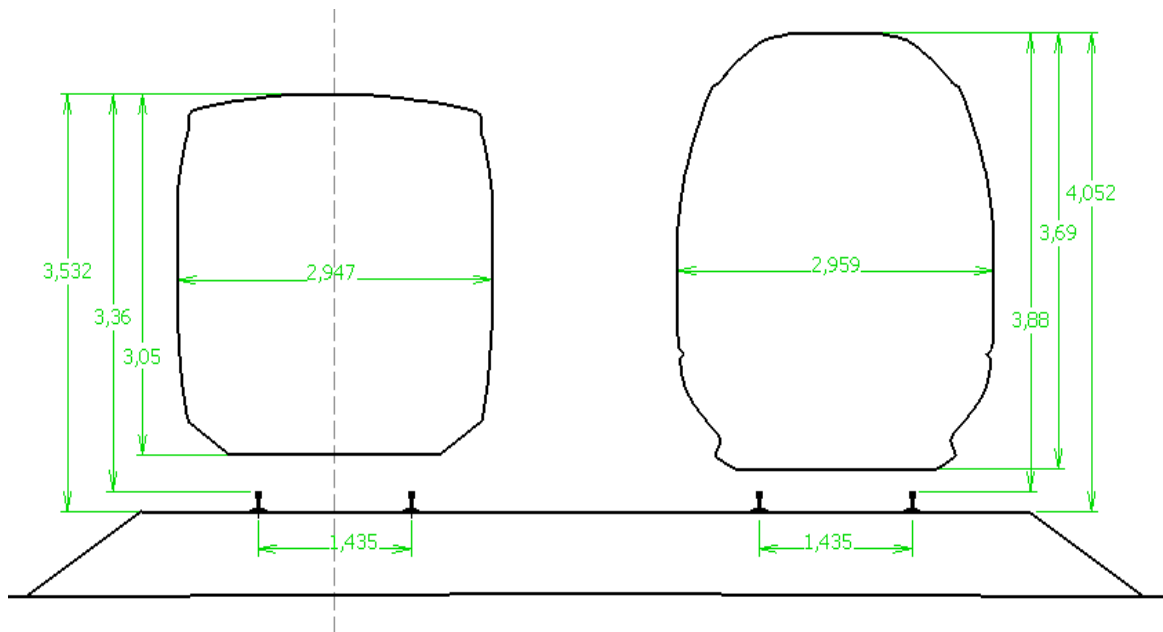


Imagen 5.4: Perfiles en el programa CATIA del Serie 102 (TALGO 350) a la izquierda y el Serie 103 (SIEMENS Velaro E) a la derecha. Cotas en metros.

Como se puede apreciar el serie 102 es más bajo que el 103, pero hay que tener en cuenta que, como ya se explicó, el perfil del 103 es el mismo durante todo el tren, mientras que el del 102 no, la cabeza y la cola tienen una altura y los vagones son más bajos. En la imagen el perfil que está representado es el de los vagones.

Para observar mejor en detalle la forma del perfil de los trenes, y familiarizar al lector con la forma de cada uno de ellos, se muestran en las siguientes figuras los dos perfiles de trenes que se simularán por separado.

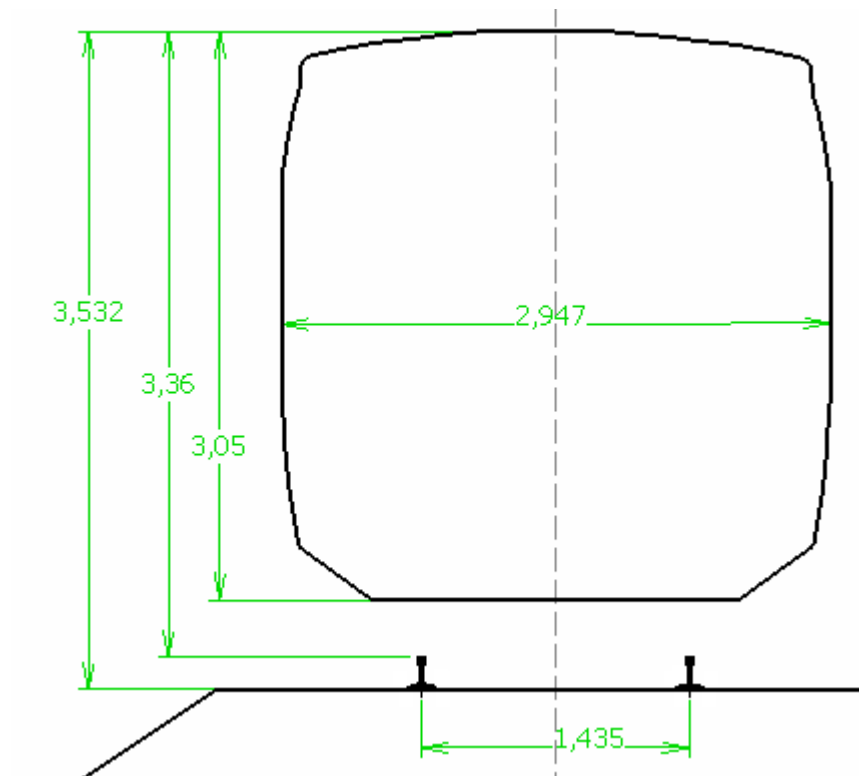


Imagen 5.5: Perfil acotado en metros del Serie 102- TALGO 350 en el programa CATIA.

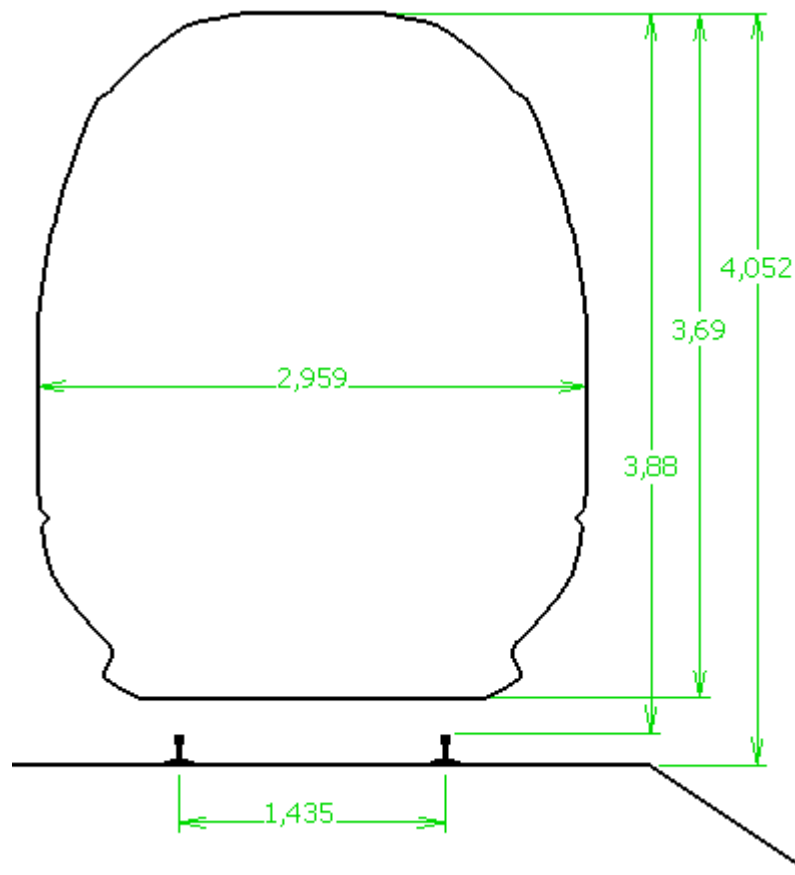


Imagen 5.6: Perfil acotado en metros del Serie 103- Velaro E en el programa CATIA.

Con estos diseños obtenidos con el programa CATIA se pueden dibujar los perfiles sobre la plataforma ya trazada en el programa GAMBIT. Una vez obtenidos las coordenadas de los puntos que definen los perfiles, es sencillo simularlos en la vía de barlovento, sotavento y en las diferentes configuraciones de vía propuestas, empleando para ello traslaciones en el plano.

Estos contornos que aparecen en las figuras superiores, y que han sido elaborados a partir de esquemas obtenidos de Internet y revistas especializadas, son los que se emplearán en las simulaciones en CFD. Hay que resaltar que su obtención ha sido laboriosa al carecer de planos en formato compatible con algún programa CAD de los trenes elegidos para el desarrollo de este proyecto.

5.4.- DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS QUE SE VAN A LLEVAR A CABO.

Antes de comenzar a describir y justificar los ensayos, se va a realizar un recordatorio de los modelos que se han planteado hasta ahora, a partir de los parámetros.

Sin tener en cuenta las barreras para-viento, ni su forma, ni su disposición, en este proyecto se simularán ocho escenarios en base a:

- Los dos modelos de infraestructura, vía en terraplén y vía en viaducto.
- Los dos modelos de trenes propuestos, la Serie 102 y la Serie 103.
- Y la disposición del tren en la vía de barlovento o de sotavento.

Con estas tres variables, se obtienen los ocho modelos antes citados. Para facilitar su referencia se usará un código de tres dígitos donde:

- El primer dígito será T o V, dependiendo de si es vía en Terraplén o en Viaducto.
- El segundo dígito será 2 o 3, dependiendo de si el tren simulado es el 102 o el 103.
- El tercer dígito mostrará el lado de la vía, B para vía de Barlovento y S para la de Sotavento.

En la siguiente tabla se muestran los ocho escenarios posibles con sus respectivas ilustraciones.

T2B	T2S
T3B	T3S
V2B	V2S
V3B	V3S

Tabla 5.4: Escenarios de simulación a tener en cuenta sin contar con las barreras.

Además para cada uno de estos modelos se ensayarán diferentes barreras, dentro de las barreras que se definieron en el anterior apartado y que están definidas por las siguientes variables.

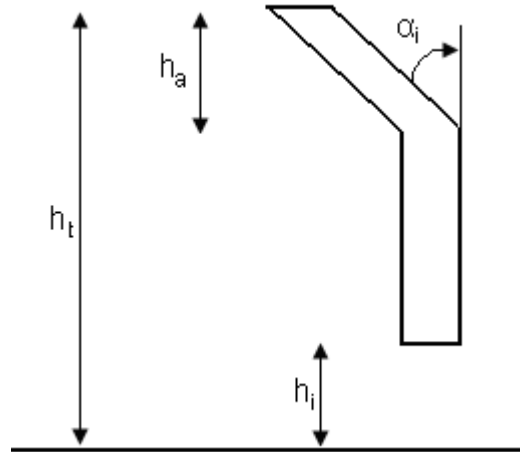


Imagen 5.7: Esquema general de los parámetros que definen las barreras.

Donde:

- h : Altura total de la barrera.
- h_i : Altura del hueco inferior de la barrera.
- h_a : Longitud superior inclinada de la barrera
- α_i : Ángulo de inclinación de la barrera.

Estos cuatro parámetros, definen cada una de las barreras y tomarán diferentes valores en función de los análisis. Lo que si se hará es acotar cada uno de ellos entre unos márgenes razonables a la hora de definir cada ensayo.

Si se ensayasen sobre cada uno de los ocho escenarios todas las posibles barreras que se definen en base a estos cinco parámetros, el proceso de cálculo y análisis se haría excesivamente complejo y costoso.

Por ello, y ante la falta de documentación sobre el fenómeno de la influencia de los parapetos sobre trenes de alta velocidad, tal y como se ha comentado en anteriores capítulos, ha sido necesario dividir el estudio en dos análisis que pasamos a definir.

5.4.1.- ENSAYOS Y ANÁLISIS PREVIOS DE EVALUACIÓN.

Primero se planteará un proceso previo de evaluación del fenómeno con el objetivo de definir los parámetros geométricos más relevantes para el diseño aerodinámico de las barreras de protección frente a viento lateral.

Este proceso estará formado por ensayos simples, cuyos datos puedan ser fácilmente visualizados en gráficas o en mapas de presiones y velocidades, fundamentalmente porque se buscan resultados de una manera rápida y sin entrar en formulaciones matemáticas ni en el manejo de muchos datos.

Con este estudio previo se descartarán muchas de las soluciones propuestas y se seleccionarán solo las que se consideren más importantes o relevantes, de manera que el estudio en detalle contará con un número reducido de casos que permitirán que se estudien en más profundidad.

Dentro de los objetivos del ensayo previo está:

- Comparar la influencia del tipo de tren.
- Comparar la influencia del tipo de estructura.
- Comparar la influencia del posicionamiento en la vía (barlovento o sotavento).
- Decidir el emplazamiento más eficaz de las barreras en vía sobre terraplén.
- Acotar la altura como parámetro fundamental de definición de las barreras obteniendo a priori los valores más eficaces que serán los que se ensayen en detalle, donde ya se evaluarán el resto de parámetros que las definen.

5.4.2.- ENSAYOS Y ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN.

Se puede decir que los ensayos previos actuarán como criba para la selección de las mejores alternativas o las más interesantes, que serán las que se estudien posteriormente en los estudios en detalle.

Con los resultados de estos ensayos previos se elaborarán aquellos modelos que resulten más interesantes de cara al estudio en detalle de optimización.

Con este estudio en detalle se pretende presentar las soluciones más eficaces a modo de barreras para-viento en cada situación, evaluar sus efectos y justificar las soluciones que se planteen con una base de datos y sus respectivos cálculos detallados extraídos del programa de CFD.

5.4.3.- ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS.

Con estos valores obtenidos se evaluará el rendimiento de las medidas de mitigación propuestas en base a la Especificación Técnica de Interoperabilidad de la Unión Europea, siguiendo el desarrollo expuesto en el apartado 3.2.4 del capítulo 3.

De esta forma se podrá tener una idea de las mejoras en las condiciones de circulación que se pueden obtener si se instalan aquellas medidas de mitigación que según los ensayos de optimización den los mejores resultados.

Además se realizará un análisis estructural y económico de aquellas soluciones que den mejores resultados, para evaluar desde diferentes puntos de vista su viabilidad.

6. ENSAYOS Y ANÁLISIS.

CAPÍTULO 6: ENSAYOS Y ANÁLISIS.

En el capítulo anterior quedaban definidos los análisis que van a cubrir este capítulo y la motivación que ha llevado al desarrollo de cada uno de ellos.

A modo de introducción de este capítulo de ensayos y análisis se va a introducir brevemente de nuevo en que van a consistir. Este capítulo se va a dividir en tres grandes partes o bloques:

- Una primera donde se planteará un proceso previo de evaluación del fenómeno con el objetivo de definir los parámetros geométricos más relevantes, y también realizar un estudio que permita una primera criba de las soluciones.
- Con los resultados de estos ensayos previos se elaborarán aquellos modelos que resulten más interesantes de cara a un estudio en detalle de optimización con simulaciones más precisas y complejas. De aquí saldrán las medidas de mitigación que resulten más eficaces en cada situación.
- Por último se evaluará el rendimiento de las mejores medidas de mitigación propuestas desde un punto de vista económico y técnico en base a las normativas y Especificaciones Técnicas Europeas vigentes.

Cada una de estas partes contará con una serie de ensayos realizados en base a simulaciones con el programa de CFD elegido, así como unas valoraciones de estos ensayos y sus resultados.

El objetivo de este capítulo es el de aportar mediante un estudio detallado una evaluación de la afectación lateral del viento sobre los trenes en diferentes circunstancias, y soluciones en forma de barreras laterales que permitan mitigar los efectos negativos del viento lateral, y evaluar su viabilidad en función de diferentes factores.

6.1.- ENSAYOS Y ANÁLISIS PREVIOS DE EVALUACIÓN.

Estos ensayos plantean un proceso previo de evaluación del fenómeno con el objetivo de definir los parámetros geométricos más relevantes. Y de realizar un estudio de la afectación frente a vientos laterales de una determinada infraestructura perteneciente al territorio español así como de los trenes de alta velocidad RENFE que efectúan servicios en ella.

Este proceso estará formado por ensayos de caracterización en el que los resultados se presentaran de forma fundamentalmente gráfica, porque se busca una interpretación rápida y sin entrar en formulaciones matemáticas ni en el manejo de muchos datos.

Este estudio previo también valdrá para descartar muchas de las soluciones propuestas y seleccionar solo las que se consideren más importantes o relevantes, de manera que el estudio de optimización contará con un número reducido de casos que permitirán que se estudien en más profundidad.

Los ensayos previos que se van a plantear tiene una serie de objetivos particulares, que se resumen de manera rápida en estos cuatro puntos:

- Decidir el emplazamiento más eficaz de las barreras en vía sobre terraplén.
- Comparar la influencia del tipo de tren en los efectos que el viento lateral tiene sobre este.
- Comparar la influencia del tipo de infraestructura y del posicionamiento en la vía (barlovento o sotavento).
- Acotar el principal parámetro de las barreras, la altura, obteniendo a priori los valores más eficaces, que servirán para el planteamiento de los ensayos en detalle.

El propósito es dar repuesta a estos cuatro objetivos con ensayos de complejidad media que permitan reproducir las condiciones de manera fiable pero que no lleven demasiado tiempo en su resolución.

Lo que se busca es acotar una serie de valores y tener unos órdenes de magnitud, no sacar conclusiones detalladas. Con esta finalidad se plantean diferentes ensayos pero todos ellos comparten aproximadamente los mismos modelos, geometrías, mallados y condiciones de operación y de contorno.

De esta forma se consigue simplificar en parte el proceso de desarrollo y preproceso de los diferentes ensayos, cada uno con sus correspondientes simulaciones en diferentes condiciones.

Primero se van a definir las condiciones generales que comparten todos los ensayos previos, y luego posteriormente se presentarán cada uno de ellos por separado, con su descripción detallada, sus objetivos particulares, los resultados y valoraciones, y finalmente se elaborarán unas conclusiones generales de los ensayos previos.

6.1.1.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LOS ENSAYOS PREVIOS.

Como ya se ha dicho, todos los ensayos previos que se van a desarrollar comparten el mismo planteamiento. Con el objetivo de reducir al máximo posible los tiempos y de crear ensayos que sean fácilmente comparables se ha optado por desarrollar todas las simulaciones con iguales condiciones.

Las únicas diferencias que se pueden encontrar son, obviamente, los diferentes parámetros que se evalúan. Como consecuencia las mallas no pueden ser exactamente iguales en todos los modelos, pero si se puede decir que la forma de construirla es la misma, y que las variaciones entre mallados son realmente muy leves.

Por ejemplo es obvio que el mallado alrededor del tren 102 no puede ser igual al del tren 103, ya que tienen considerables diferencias morfológicas, pero si es cierto que los nodos que definen el mallado alrededor de las superficies, están situados a lo largo del perfil de ambos trenes con la misma separación, e igual pasa con el resto de elementos que conforman los modelos.

A continuación se van a especificar uno por uno los parámetros generales que definen estos ensayos previos, geometrías, mallados, condiciones de contorno, condiciones de operación, así como los parámetros que se pretenden evaluar.

Geometría de los modelos.

La geometría de los modelos y su marco general ya han sido especificados en el anterior capítulo 5, y como ya se vio son generales para todos los ensayos que conforman este trabajo, y por tanto también para estos ensayos previos.

La única particularidad que se puede citar de estos ensayos es que todas las barreras para-viento que se van a simular son las correspondientes al tipo A ya definido y que se muestra en la figura 4.12.

Esta barrera es la más sencilla, es simplemente una placa plana colocada vertical al suelo sin deflectores ni huecos inferiores. Por tanto está definida por un único parámetro que es su altura y como es la base de las otras barreras, resulta la más adecuada para estos primeros ensayos de caracterización.

A lo largo de estos ensayos previos se simularán modelos con distintas alturas de barreras, para evaluar los diferentes efectos, que se presentaban en los objetivos, en diferentes condiciones de protección frente al viento.

Condiciones del mallado.

Para estos primeros ensayos se ha planteado un mallado que no fuera costoso de construir ni de calcular. Se ha dibujado una malla que solo contiene celdas triangulares poniendo cuidado en la calidad de las celdas que se han construido, intentando que sean lo más regulares posibles.

Con estos condicionantes se han desarrollado los diferentes mallados. Obviamente no todos pueden ser iguales, dado que hay parámetros como el tipo de tren, la infraestructura (viaducto o terraplén) o la misma altura de la barrera que hace que varíe levemente la forma del mallado.

Para que éste sea lo más parecido posible entre un modelo y otro, lo que se ha hecho es construirlo a partir de nodos en las líneas que definen las superficies, de tal manera que cada nodo constituye un vértice raíz de una celda. Partiendo de estos vértices raíces el programa GAMBIT construye el mallado mediante triángulos lo más equiláteros posibles.

Con esta construcción del mallado por nodos se consigue que alrededor de superficies iguales haya la misma densidad de celdas.

En la siguiente figura se puede ver una imagen general de uno de los mallados a simular. Se comenzará comentando el caso de vía sobre terraplén que es más general y luego se señalarán las particularidades de los modelos sobre viaducto.

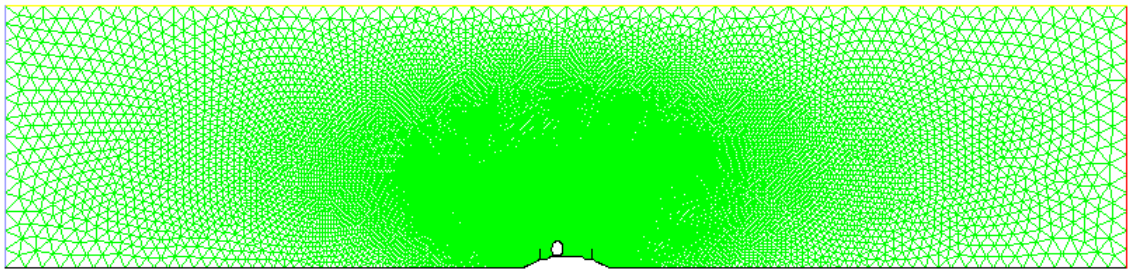


Imagen 6.1: Vista general del dominio computacional en terraplén mallado.

Como se aprecia en la imagen anterior el mallado es más denso en los alrededores de la zona que se quiere estudiar con más detalle, para de esta forma conseguir una mayor precisión en los resultados.

Por tanto el mallado no es regular. Se define a partir de la distancia entre nodos, que es diferente en cada una de las líneas que definen las superficies. En función de la necesidad de precisión el mallado se hace más o menos tupido.

En las líneas que conforman las paredes laterales y superior del dominio los nodos están separados una distancia uniforme de 5m. En el límite inferior del dominio, lo que sería el suelo hasta llegar a la zona donde comienza el terraplén que sirve de asiento a la vía, la distancia entre nodos no es uniforme, sigue una progresión lineal de manera que los nodos cerca de los extremo del dominio están situados a 5m, y los cercanos al terraplén a 0,3m.

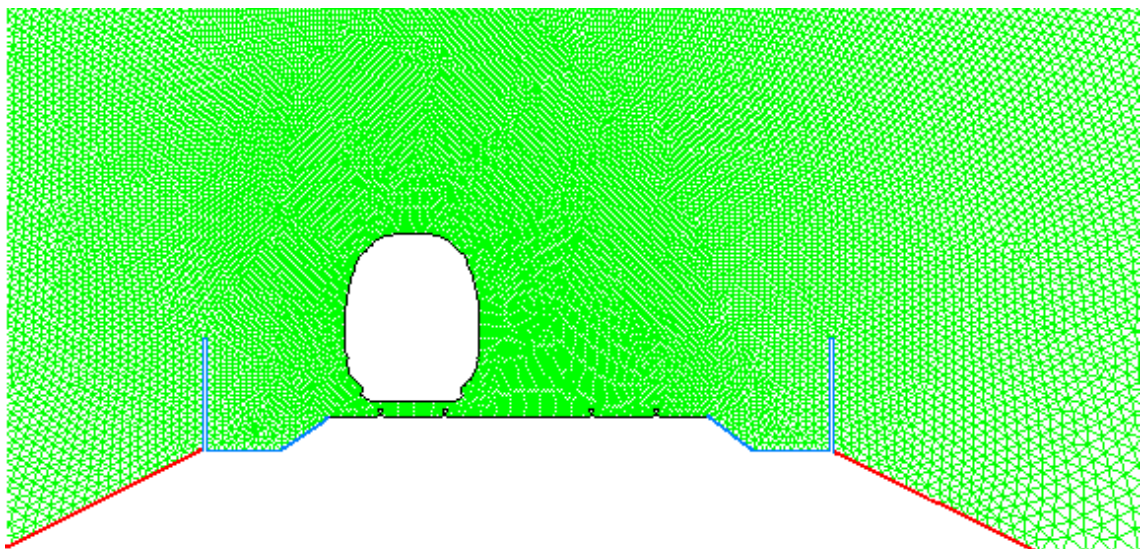


Imagen 6.2: Detalle del mallado alrededor de la infraestructura.

La zona de la infraestructura y el tren tiene los nodos mucho más juntos, separados distancias uniformes de 0,1m en la superficie del tren y zona superior

de la vía y raíles, de 0,15m en las barreras, el balasto y superficies coloreadas de azul en la figura superior y de 0,3m en lo que sería la pendiente del terraplén, coloreado en la figura superior de rojo.

Con estas cifras de separación entre nodos definidas, el programa GAMBIT construye el mallado de forma proporcional a base de triángulos lo más regulares posibles. Las siguientes figuras muestran los detalles de éste.

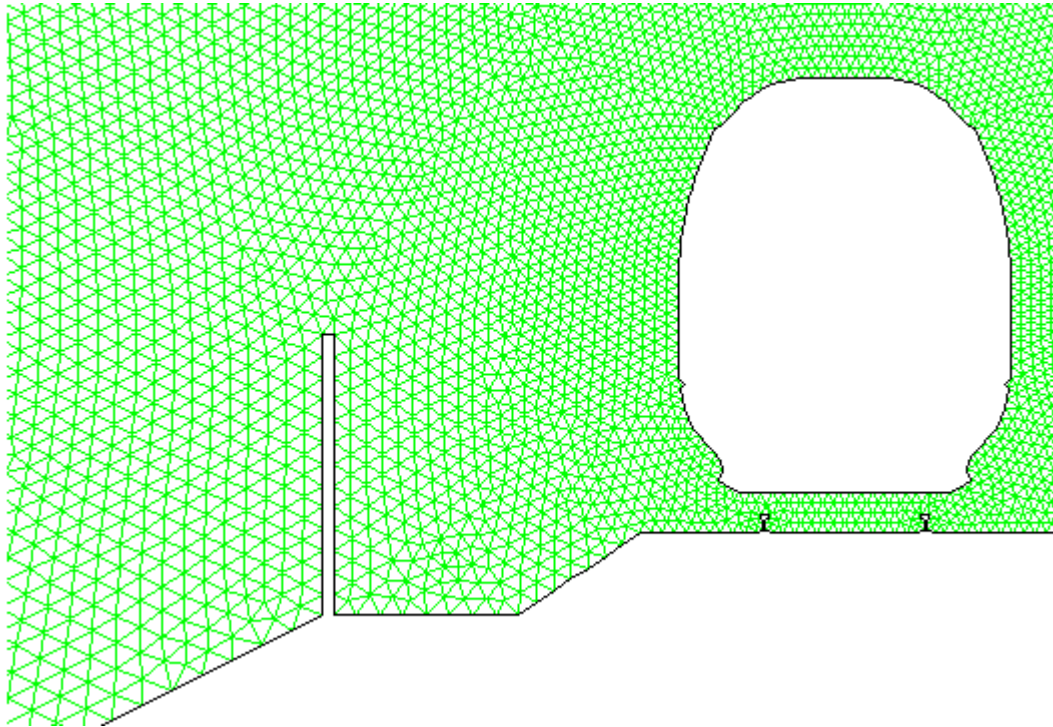


Imagen 6.3: Vista en detalle del mallado en los alrededores del tren.

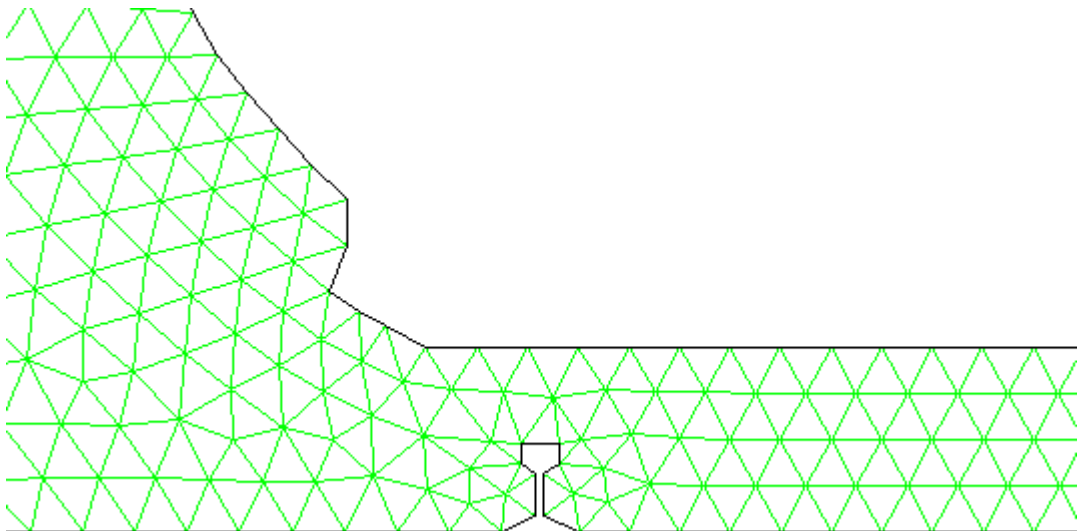


Imagen 6.4: Vista en detalle del mallado en los bajos del tren.

Todo lo comentado hasta ahora para el mallado ha sido para un modelo de tren en terraplén. Obviamente el modelo de tren sobre viaducto, aunque pueda parecer similar, tiene una serie de pequeñas diferencias que se enumeran de manera rápida.

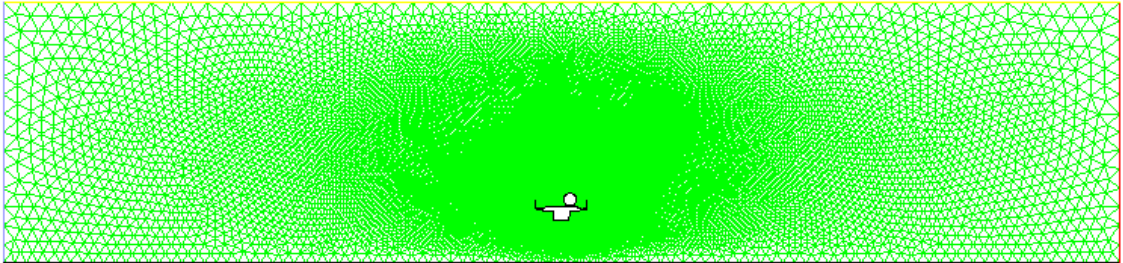


Imagen 6.5: Vista general del dominio computacional en viaducto mallado.

El límite inferior del dominio no tiene la misma división que en el caso del terraplén, esta línea tiene un nodo cada 4m, salvo en la zona bajo el viaducto que están situados cada 2m para dotar de más precisión y regularidad a estas celdas que ocupan la franja entre el suelo y el viaducto.

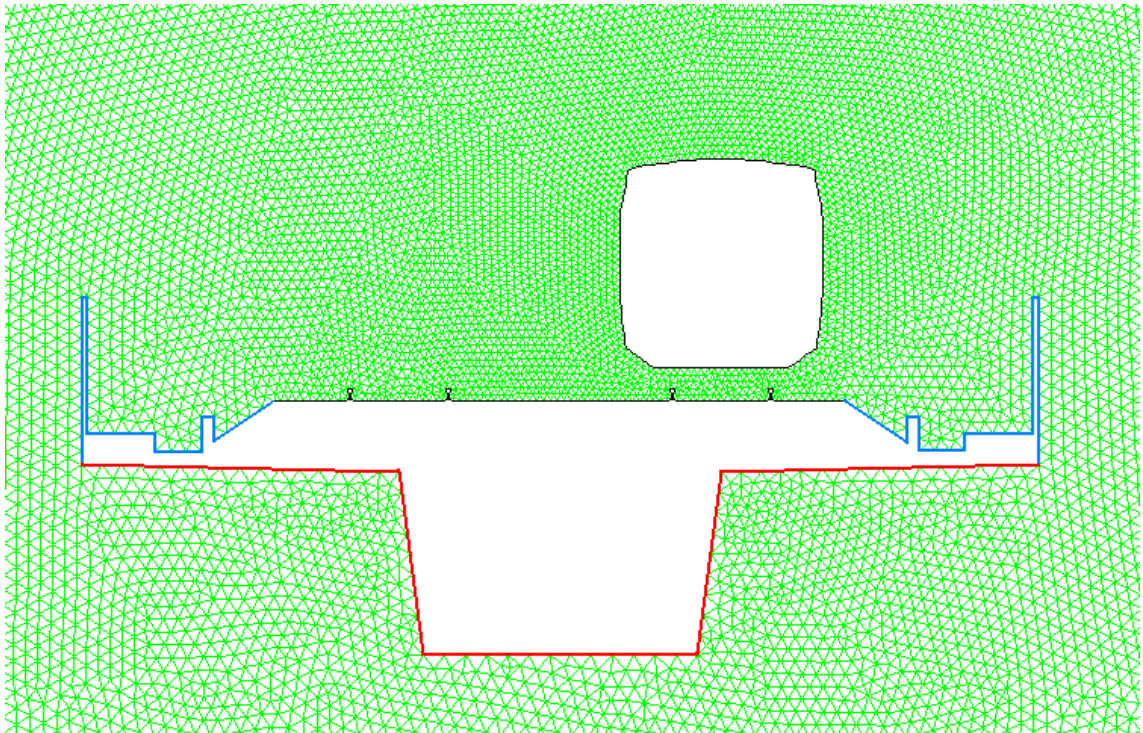


Imagen 6.6: Vista en detalle del mallado en viaducto.

Al igual que para el caso del terraplén la zona de la infraestructura y el tren tiene los nodos mucho más juntos, separados distancias uniformes de 0,1m en la superficie del tren y zona superior de la vía y raíles, de 0,15m en las barreras y

superficies coloreadas de azul y de 0,3m en lo que sería resto de la infraestructura del viaducto, coloreado en la figura superior de rojo.

Como se aprecia el mallado alrededor del tren es en ambos casos prácticamente el mismo, da igual que el tren esté situado en vía sobre viaducto o sobre terraplén, ya que los valores adoptados de separación entre nodos son iguales.

Se puede afirmar por tanto que todos los mallados son prácticamente equivalentes. El número de celdas varía en función de la altura de la barrera y del tipo de tren. Aún así este número es más o menos el mismo para todos los modelos presentados en los ensayos previos, y contienen entre 75.000 y 85.000 celdas triangulares cada modelo.

Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno también son las definidas y explicadas en el capítulo cinco. Aquí no se van a volver a definir, solo se presentaran los valores característicos y parámetros que especifican estos ensayos en concreto.

Se empleará una velocidad del aire a la entrada de 20m/s en dirección horizontal al suelo. Este valor son algo más de 70km/h y su elección está fundamentada en los estudios recogidos en el capítulo 3. Realmente el valor de velocidad en estos ensayos previos es poco relevante ya que se busca comparar alternativas mediante variables adimensionales.

No obstante este valor de 20m/s es un valor medio que se considera puede dar las mejores aproximaciones posibles a la hora de realizar estos análisis previos de comparación. No es una velocidad excesivamente alta, ya que se vio que se podían llegar a alcanzar velocidades de hasta el doble en situaciones extremas de viento, pero lo que se quiere con este ensayo es caracterizar diferentes barreras y no obtener valores de fuerza sobre el tren, que si dependen en mayor medida de la velocidad del viento.

Los valores de energía cinética turbulenta y de relación de disipación turbulenta que definen la turbulencia del flujo de entrada son los que el programa FLUENT define por defecto y los que recomiendan en su manual de usuario para las condiciones en que se van a desarrollar estos ensayos.

Además decir que estos valores están dentro del marco que establece la Especificación Técnica de Interoperabilidad del subsistema de material rodante del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad en su anexo G sobre los efectos de los vientos cruzados.

Las rugosidades y demás condiciones de contorno como presión o temperatura que no han sido especificadas en este apartado están perfectamente definidas en el capítulo 5 en sus correspondientes subapartados, y se considera que su recopilación en este apartado resultaría reiterativa.

Condiciones de operación:

El modelo de resolución de las ecuaciones que se va a emplear en todos los ensayos previos es el Standard k- ϵ que ya se definió en el apartado 3.1.2.3. Es un modelo de 2 ecuaciones muy usado en la industria, robusto, económico en cuanto a recursos informáticos, y razonablemente exacto.

Aunque sus resultados son mediocres para flujos complejos que implican gradientes de presión severos, fuertes cambios de dirección de las líneas de flujo, remolinos y rotaciones, para los objetivos marcados en estos ensayos previos, este modelo de dos ecuaciones es más que suficiente. Sus resultados son perfectamente válidos, y simulaciones con modelos de resolución más fiables, que fueron realizadas a modo de prueba, ofrecían los mismos valores con mayores tiempos de iteración, lo que justifica el empleo de este modelo más simple en estas simulaciones.

Parámetros a evaluar.

Como son ensayos que buscan fundamentalmente comparar, lo mejor es emplear para su estudio parámetros adimensionalizados y figuras y gráficas que permitan comparar simulaciones semejantes.

El objetivo es delimitar el estudio y servir para focalizar los análisis en detalle de manera que estos resulten lo más efectivos posibles. Para este fin en estos ensayos previos se evaluarán los siguientes parámetros:

- Presión y velocidad sobre la superficie del tren y las barreras. Se evaluarán con mapas de presiones y mapas de vectores de velocidad que conforman líneas de flujo muy útiles para conocer la distribución y forma de las estelas al encontrar perturbaciones.

- Coeficientes adimensionales (los ya definidos en la ecuación 3.2.2.5), tanto de fuerza lateral como de sustentación. Estos coeficientes nos dan una idea adimensional de la fuerza lateral y de sustentación que actúa sobre el tren.

La mejor forma de entender la influencia del viento sobre el tren es mediante estos coeficientes adimensionales. En estos ensayos se van a manejar dos, el de fuerza lateral (C_x o C_s) y el de fuerza de sustentación (C_y o C_l). Por el hecho de ser adimensionales, estos coeficientes resultan muy útiles a la hora de comparar diferentes situaciones y escenarios.

Valores del coeficiente C_x cercanos a cero implicaría que el tren no se ve afectado por el viento lateral. De igual forma cuanto mayor sea este coeficiente mayor afectación, y si es negativo es porque se crea una depresión que fuerza al tren al sentido contrario al viento.

Para este proyecto los valores de C_y , son menos importantes, pero también se tendrán en cuenta en la mayoría de los ensayos, ya que valores muy altos de C_y implican que el viento levanta el tren, haciendo que su “peso” sea menor. Valores negativos de C_y tienen el efecto contrario, es decir ayudan a que el tren se pegue más a la vía.

Habría que realizar cálculos dinámicos para evaluar hasta que punto estas variaciones de C_y pueden afectar a un tren de 17t/eje, y si lo hacen estudiar en que medida. Hay que tener en cuenta que un coeficiente de C_y igual a 1, equivale a unos 1000N/m de fuerza vertical, que viene a ser algo así como un 5% de disminución del peso total del tren.

Ambos coeficientes se representarán mediante gráficas donde se muestre su evolución en función de las diferentes medidas que se vayan proponiendo, y sus valores se presentarán en tablas en los respectivos anexos.

6.1.2.- ENSAYO 0: DETERMINACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO MÁS ACONSEJABLE PARA LAS BARRERAS EN LA CONFIGURACIÓN DE VÍA SOBRE TERRAPLÉN.

Este ensayo ha sido llamado cero porque es previo al resto de ensayos y a su correspondiente numeración y nomenclatura que hemos estandarizado. Con este ensayo se busca determinar cuál de los dos lugares propuestos para el

emplazamiento de las barreras para-viento, en la configuración en terraplén, es el óptimo.

6.1.2.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 0.

Como se expuso en el apartado 4.3.1, existen dos opciones para colocar la barrera para-viento en la configuración de vía sobre terraplén:

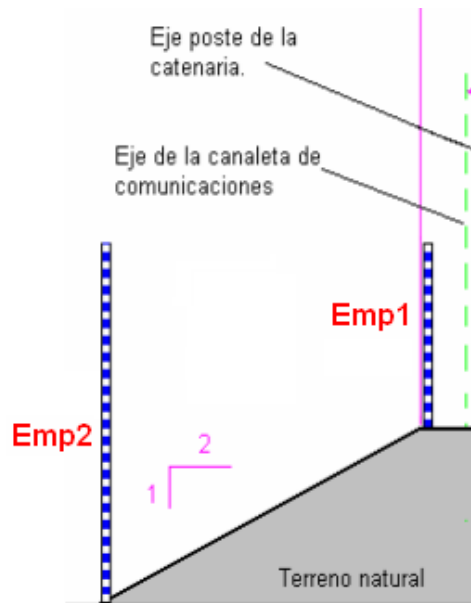


Imagen 6.7: Posibles emplazamientos de la barrera en terraplén.

Con este ensayo se pretende averiguar de una manera rápida cual es la opción más ventajosa dentro de las dos que, según los planos y las restricciones de gálibo, se pueden plantear. Una de ellas está sobre el terraplén, más cercana a la vía, y la otra por debajo del terraplén, es decir, más alejada y más baja (algo más de dos metros por debajo).

A priori el emplazamiento 1 debería ser más eficaz, ya que se encuentra a mayor altura y más cerca del tren, por tanto debería dar más protección frente al viento a igualdad de metros cuadrados de barrera instalados, pero esto es lo que se busca demostrar experimentalmente.

6.1.2.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 0.

Se va a considerar en el ensayo exclusivamente el modelo del tren 103. No será lo habitual, pero como es un ensayo 0, se busca justificar y corroborar de manera lo más rápida posible una idea que ya se tiene, que es que el emplazamiento 1 es a priori más eficaz.

Se van a realizar para cada uno de los dos emplazamientos simulaciones con el tren 103 situado a barlovento y a sotavento. Cada uno de los modelos se simulará con 4 alturas de barreras diferentes (0, 1, 2 y 4) lo que en total supone que se van a realizar 16 simulaciones, pero en realidad son 14 ya que las de altura 0m solo es necesario realizarlas una vez.

El siguiente cuadro muestra las 16 simulaciones que se van a realizar, con sus diferentes características. A la derecha se representa la nomenclatura que se va a seguir para identificarlas (en este caso es especial y por eso es el ensayo 0) y el bloque al que pertenecen. Las marcadas en gris son las que están repetidas, ya que el ensayo con ausencia de barrera es obvio que es el mismo.

Definición.	Barlovento/Sotavento	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.	Bloque
Simulaciones con la barrera situada en el emplazamiento 1.	Tren a barlovento	0	Emp1_B_0	0.1
		1	Emp1_B_1	
		2	Emp1_B_2	
		4	Emp1_B_4	
	Tren a sotavento	0	Emp1_S_0	0.2
		1	Emp1_S_1	
		2	Emp1_S_2	
		4	Emp1_S_4	
Simulaciones con la barrera situada en el emplazamiento 2.	Tren a barlovento	0	Emp2_B_0	0.3
		1	Emp2_B_1	
		2	Emp2_B_2	
		4	Emp2_B_4	
	Tren a sotavento.	0	Emp2_S_0	0.4
		1	Emp2_S_1	
		2	Emp2_S_2	
		4	Emp2_S_4	

Tabla 6.1: Simulaciones realizadas en el ensayo 0.

6.1.2.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 0.

En el anexo C se presentan los mapas de presiones y de vectores de velocidad que se han obtenido en las simulaciones de este primer ensayo. Los mapas están divididos en los cuatro bloques señalados en el cuadro superior, y para facilitar su lectura, todos están representados en la misma escala de colores, que se incorpora a la izquierda del cuadro del anexo y rotulados debajo con su correspondiente nomenclatura.

Su análisis es muy complejo, por ello antes de estudiar los mapas de presiones y de velocidades se van a representar las gráficas que reflejan los resultados numéricos de los coeficientes adimensionales, que también están recogidos en el anexo en la Tabla C.1.

Estos coeficientes nos dan una idea de la afectación que tiene el viento sobre el tren, cuanto mayor sea el valor de este coeficiente, más se verá afectada la dinámica lateral del tren.

La siguiente gráfica presenta la variación del coeficiente de fuerza lateral o C_x para las diferentes simulaciones realizadas en el ensayo 0. Representados en azul están los valores correspondientes a la simulación con la barrera en el emplazamiento 1, y en color rojo los del emplazamiento 2. Las líneas continuas representan los ensayos con el tren situado en la vía de barlovento, y las discontinuas los realizados con el tren en la vía de sotavento.

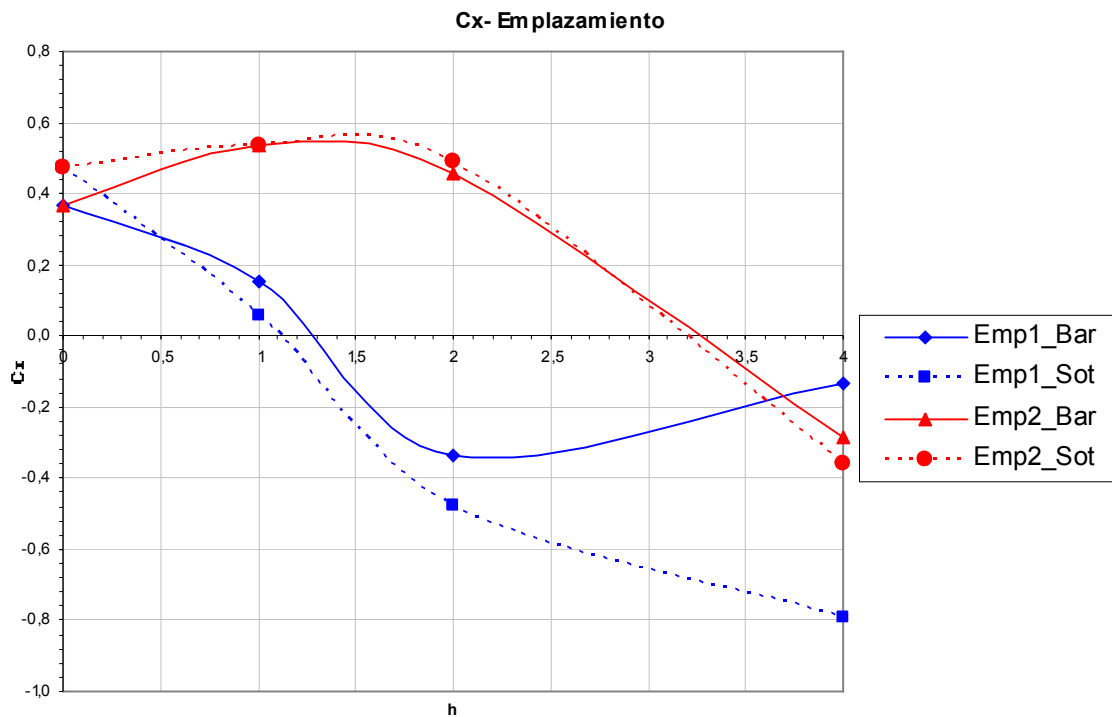


Gráfico 6.1: Variación de C_x en función del emplazamiento de la barrera en la configuración sobre terraplén. (Ensayo 0).

Se puede apreciar que si se sitúa la barrera en el emplazamiento 2 (líneas rojas), los efectos de las barreras no se dejan notar hasta los 3 metros de altura de esta, mientras que en el emplazamiento 1 (líneas azules) es necesario algo

más de un metro de barrera para disminuir los efectos del viento lateral en la fuerza lateral sobre el tren.

Como ya se comentó, al estar el emplazamiento 2 mucho más alejado y más bajo parecía lógico que los efectos de colocar una barrera en este lugar se aprecien bastante menos.

También merece la pena destacar que en el emplazamiento 1, a la vista de la gráfica, si las barreras colocadas son de más de 2m el tren se ve peligrosamente forzado a contra viento, sobre todo cuando se sitúa en la vía de sotavento. Por eso si se opta por el emplazamiento 1 habrá que tener en consideración una óptima elección de la altura de la barrera en función de las condiciones de viento bajo las que se vaya a operar.

El siguiente gráfico muestra la variación del coeficiente de sustentación o C_y en los distintos modelos planteados en este ensayo.

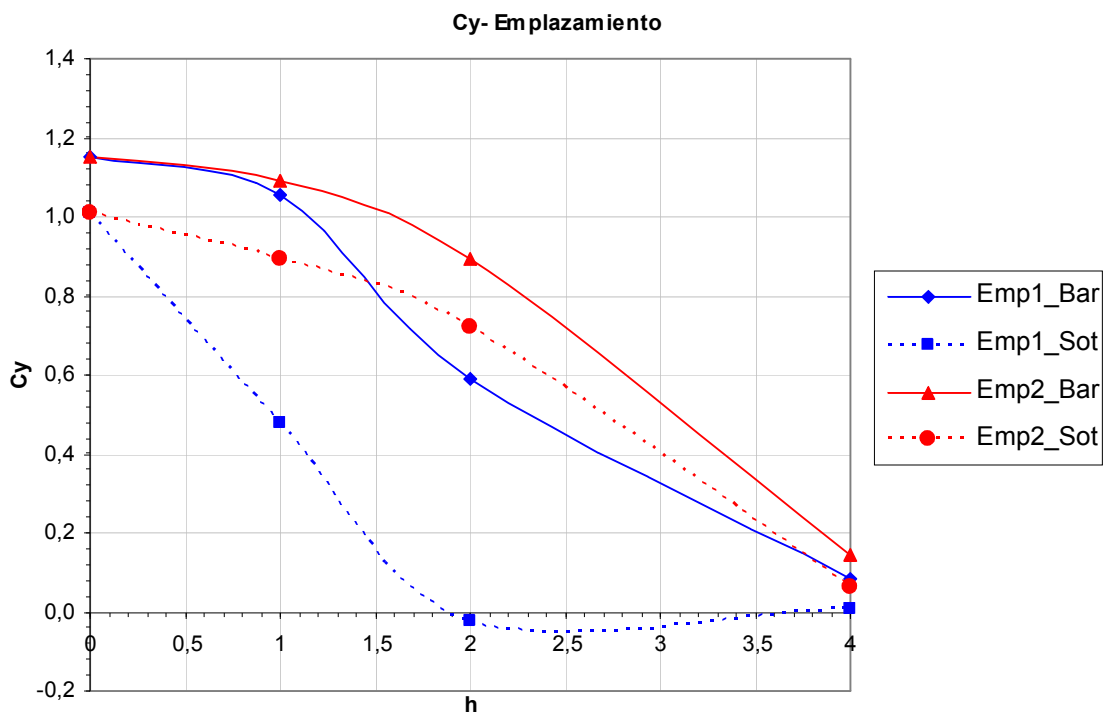


Gráfico 6.2: Variación de C_y en función del emplazamiento de la barrera en la configuración sobre terraplén. (Ensayo 0).

Este gráfico muestra que la variación de C_y es mucho más lineal, sobre todo cuando la barrera supera los 2 metros. Si se observan las vías a barlovento no se pueden sacar conclusiones, ya que ambos modelos se comportan de forma

muy similar, y aunque se aprecian diferencias, no son notables. Aún así en cualquier caso siempre se muestra una menor afectación en las vías protegidas por las barreras situadas en el emplazamiento 1.

Si se aprecian diferencias con las vías en sotavento. Las vías situadas a sotavento protegidas por parapetos en el emplazamiento 1, se ven menos afectadas por los efectos del viento lateral, y a partir de los dos metros de altura de barrera se puede decir que el viento no influye en la dinámica vertical del tren.

En este caso las gráficas son bastante claras y no deja lugar a dudas sobre los posibles emplazamientos, pero conviene que se observen también con detenimiento los mapas de presiones y velocidades que puedan justificar estos resultados y que se estudian a continuación.

La observación de los mapas de presiones refleja las claras diferencias ya comentadas. Las simulaciones realizadas con el emplazamiento 1 muestran como la presión sí disminuye notablemente al aumentar la altura de barrera, y se deja notar su influencia desde el metro de altura. No así con las simulaciones en el emplazamiento 2, donde con barreras de 2m, la afectación del viento apenas disminuye, y con barreras de 1m, su influencia es casi despreciable.

Sirva para ilustrar estas diferencias las siguientes imágenes, aunque se recuerda al lector que en el anexo C puede encontrar todas, ordenadas por bloques de la misma naturaleza dentro del ensayo.

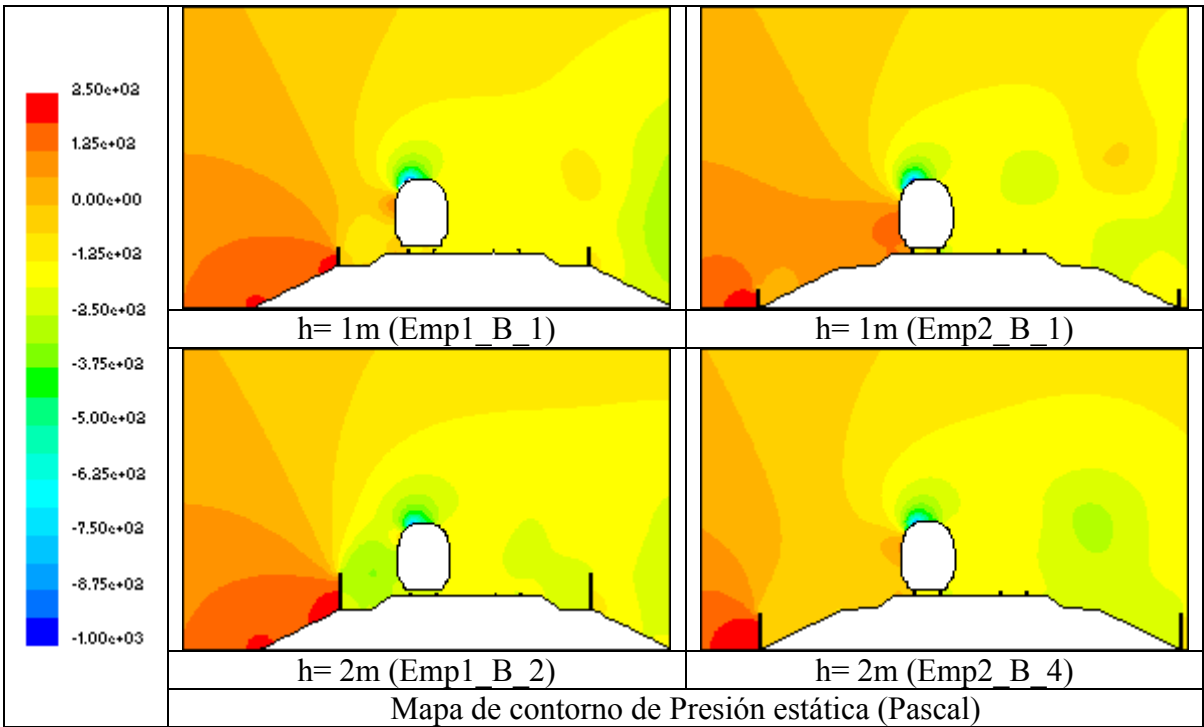


Tabla 6.2: Comparación entre los diferentes emplazamientos de las barreras en terraplén.

Se puede apreciar en las imágenes superiores, como alturas de barreras iguales protegen más al tren si están situadas en el emplazamiento más cercano. Con barreras de 1m de altura situadas en el emplazamiento 1, el tren casi no sufre presiones positivas en su costado izquierdo, y en cambio si la misma barrera se sitúa en el emplazamiento 2, se puede ver como si existen presiones positivas en el costado del tren.

Observando los mapas de velocidades, que se presentan a continuación, se puede entender mejor el porqué de estas diferencias comentadas. En la siguiente tabla se representan algunas de las situaciones más ilustrativas de este fenómeno para poder analizarlas de forma rápida.

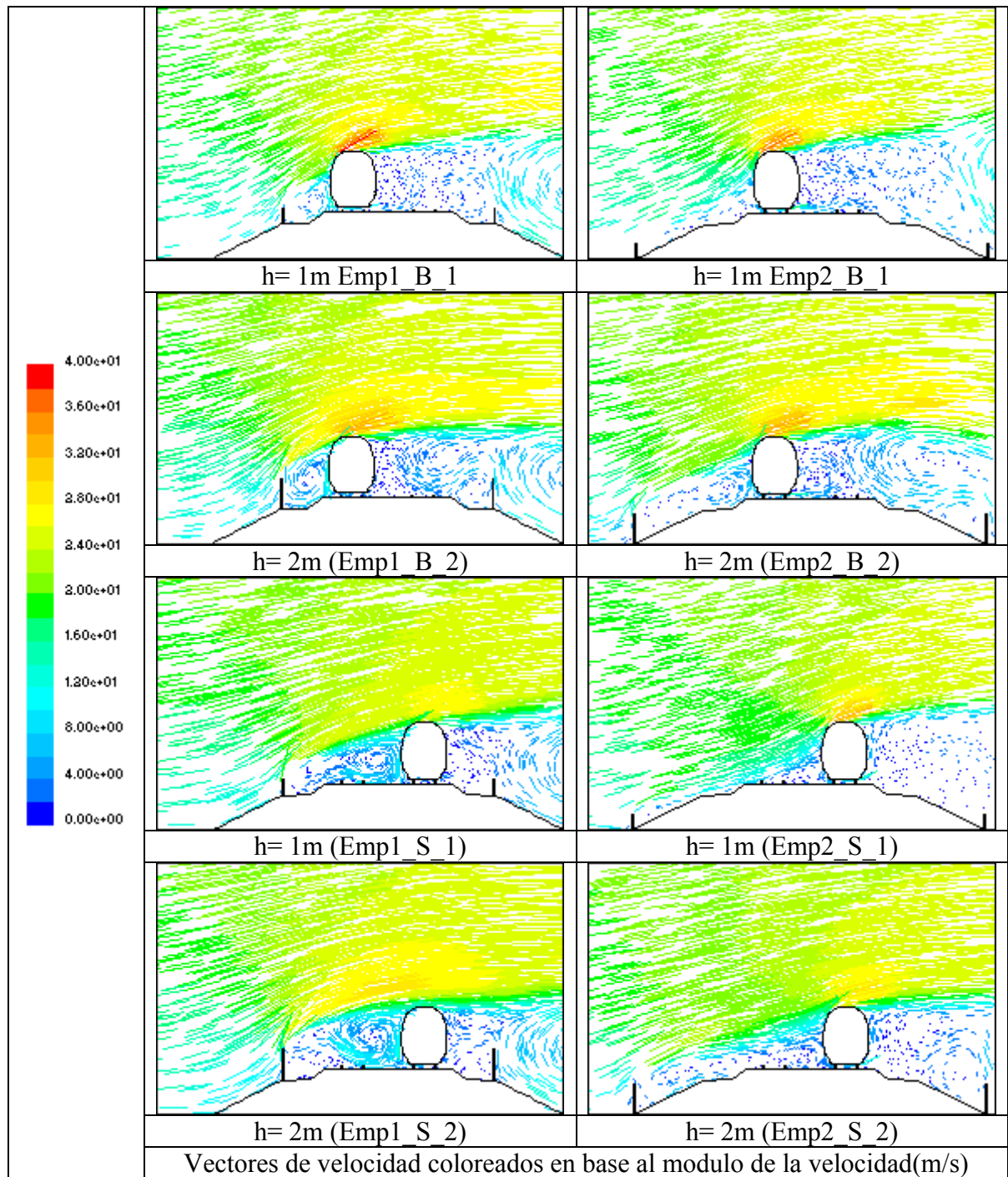


Tabla 6.3: Comparación de mapas de velocidades de diferentes simulaciones del ensayo 0.

Como se ve en las figuras, tanto en las configuraciones con tren a barlovento como en las de sotavento, las barreras en el emplazamiento 2 (representadas en la columna de la derecha) no consiguen hacer que la estela pueda superar del todo la altura del tren, y con alturas de 2 metros la corriente impacta casi de lleno contra la superficie lateral de éste, lo cual es la causa de que los C_x con dos metros de altura de barrera casi no disminuyan.

En cambio las barreras situadas en el emplazamiento 1 si protegen del viento lateral, y las de 2m son suficientes para desviar la corriente y hacer que no incida directamente sobre el tren.

También se puede observar como en el caso de que el tren se sitúe a sotavento se crea una gran zona de remolino, lo que conlleva bajas velocidades y ocasiona las bajas presiones que hacen que C_x alcance valores negativos altos, es decir, estos remolinos crean una depresión entre la barrera y el tren que fuerza a este a contraviento.

6.1.2.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 0.

Después del análisis efectuado, no cabe ninguna duda en afirmar que el mejor emplazamiento de las barreras, de los dos que se podían elegir, es el emplazamiento que se ha denominado 1, es decir, el más cercano a la vía.

Lo es fundamentalmente por un motivo, permite mitigar los efectos del viento lateral con menor altura de barrera, lo que a la larga supondría un importante ahorro de material. La otra alternativa está demasiado alejada, y se necesitaría de al menos el doble de metros cuadrados de barrera para conseguir efectos parecidos.

Además hay que tener en cuenta que barreras excesivamente altas están sometidas a más esfuerzos, lo que puede acarrear mayores costes de instalación al ser necesario un refuerzo en la cimentación.

Con lo que el emplazamiento más recomendable es el 1, si bien es cierto que, como ya se advertía en el análisis, será necesario controlar que la altura de la barrera no sea excesiva, ya que puede provocar grandes depresiones entre el tren y la barrera que provoquen un efecto contrario al deseado, forzando al tren a contraviento, sobre todo cuando este circula por la vía de sotavento.

Como primera estimación de cara a los futuros ensayos se puede decir que alturas de más de tres metros resultan contraproducentes, aunque esta afirmación habrá que corroborarla más adelante con más ensayos específicos que la apoyen o la desmientan.

6.1.3.- ENSAYO 1: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA Y LA SITUACIÓN EN LA VÍA EN LOS EFECTOS DEL VIENTO LATERAL SOBRE LOS DOS TRENES DE ALTA VELOCIDAD.

En este ensayo se busca la evaluación concreta de tres de los factores que a priori más pueden afectar a los efectos del viento lateral sobre la circulación de un tren de alta velocidad, que son:

- Comparar y evaluar la influencia del tipo de tren, empleando para ello modelos con los dos tipos de material rodante que ya se han detallado. De esta manera se podrá definir y analizar de forma aproximada el tipo de tren que mejor se comporta bajo los efectos negativos del viento lateral, en los distintos escenarios planteados.
- Comparar la influencia del viento lateral en función del tipo de infraestructura para estudiar las principales diferencias de afectación a la circulación que se producen como consecuencia de que el tren circule, o bien por un terraplén sobre terreno firme, o bien sobre un viaducto a cierta altura. Estos dos escenarios ya han sido definidos en el capítulo 3.
- Comparar la influencia que puede tener en estos mismos cálculos el hecho de que el tren se posicione en la vía de barlovento o en la de sotavento, y evaluar así las ventajas y desventajas de una u otra configuración a la hora de diseñar medidas de mitigación de los efectos del viento lateral.

Por tanto este ensayo va a consistir en comparar dos a dos distintas alternativas, modelos con el tren 102 y el 103, con configuración de terraplén y viaducto y dispuestos a barlovento o a sotavento. Se realizarán simulaciones con todos los escenarios posibles y mezclando estas distintas alternativas para cubrir todo el rango de posibilidades.

6.1.3.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 1.

Este ensayo pretende crear un estado del conocimiento sobre las características de los esfuerzos que sufren los trenes en cada uno de los distintos escenarios planteados.

Además con este ensayo se busca acotar el número de simulaciones, para poder realizar estudios posteriores de manera más eficaz, y permitir así centrar el estudio en aquellas condiciones que resulten más adversas y darles solución.

Igualmente aquellas situaciones y modelos que resulten más desfavorables constituyen las primeras posibilidades de planteamiento de medidas correctoras, ya que se puede proponer en la medida de lo posible que se adopten soluciones que hagan a los modelos de resultados más desfavorables parecerse a los modelos más favorables.

6.1.3.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 1.

En este ensayo se van a estudiar todos los escenarios posibles que se presentaron en la Tabla 5.7. Es decir se van a estudiar modelos de los dos tipos de trenes, sobre los dos tipos de infraestructuras definidas, y posicionados tanto en la vía de barlovento como en la de sotavento. Esto hace un total de 8 escenarios posibles.

Además cada uno de los escenarios se ensayará con parapetos de configuración A (Imagen 4.15) de cuatro diferentes alturas, 0, 1, 2 y 3 m, por lo que en total se van a plantear 32 simulaciones, que se muestran en el siguiente cuadro, donde se recoge también su nomenclatura a la derecha y como se han clasificado en base a sus características similares en cuatro bloques.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren	Barlovento/Sotavento	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.	Bloque
Simulaciones con vía en Terraplén.	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	0	T2B_0A0	1.1
			1	T2B_1A0	
			2	T2B_2A0	
			3	T2B_3A0	
		Tren a sotavento	0	T2S_0A0	
			1	T2S_1A0	
			2	T2S_2A0	
			3	T2S_2A0	
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	0	T3B_0A0	1.2
			1	T3B_1A0	
			2	T3B_2A0	
			3	T3B_3A0	
		Tren a sotavento	0	T3S_0A0	
			1	T3S_1A0	
			2	T3S_2A0	
			3	T3S_3A0	
Simulaciones con vía en Viaducto.	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	0	V2B_0A0	1.3
			1	V2B_1A0	
			2	V2B_2A0	
			3	V2B_3A0	
		Tren a sotavento	0	V2S_0A0	
			1	V2S_1A0	
			2	V2S_2A0	
			3	V2S_2A0	
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	0	V3B_0A0	1.4
			1	V3B_1A0	
			2	V3B_2A0	
			3	V3B_3A0	
		Tren a sotavento	0	V3S_0A0	
			1	V3S_1A0	
			2	V3S_2A0	
			3	V3S_3A0	

Tabla 6.4: Simulaciones realizadas en el ensayo 1.

6.1.3.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 1.

Al igual que en el ensayo 0, el anexo C recoge todos los mapas de presiones y de vectores de velocidad obtenidos en las simulaciones de este ensayo 1. Los mapas se presentan en 4 tablas de presiones y cuatro de vectores de velocidad, y cada una de ellas expone las ocho simulaciones del mismo

bloque. Para facilitar su lectura, todos están representados en la misma escala de colores, que se incorpora a la izquierda del cuadro y cada simulación está rotulada debajo con su nomenclatura.

Resulta más sencillo comenzar analizando las gráficas de los coeficientes adimensionales, que están recogidos en el mismo anexo en la Tabla C.10. La primera de ellas muestra la variación, para cada uno de los ocho modelos, de C_x en función de lo que crece la altura de la barrera.

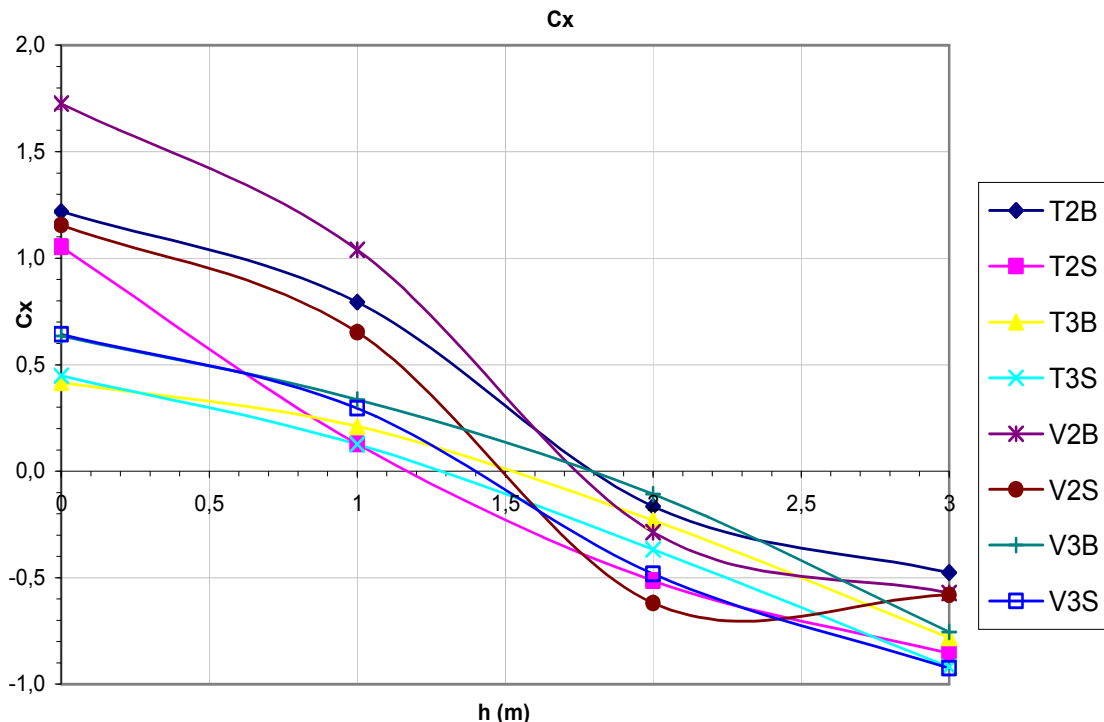


Gráfico 6.3: Variación de C_x en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios que constituyen el ensayo 1.

La lectura de este gráfico con tanta información es bastante compleja, pero si se puede realizar un pequeño análisis que marque unas primeras pautas:

La afectación lateral sobre el tren que se puede deducir de los valores expuestos en el gráfico de C_x (Gráfico 6.3) da una idea de las diferencias que existen en función del escenario, por ello será necesario un análisis más en detalle comparando cada situación. Si se observa que en principio todos están más o menos alejados de cero cuando la altura de la barrera es pequeña, y que hay una cierta convergencia en los resultados a medida que crece la altura de esta, es decir, que las barreras son eficaces en todos los escenarios posibles, pero no se puede decir que sean igual de eficaces.

Sirva el ejemplo de las simulaciones en viaducto con los trenes situados en las vías de barlovento, se observa que la altura de barrera óptima para los modelos con tren 102 y 103 es prácticamente la misma (entre 1,7m y 1,8m), en cambio con el tren 102 se reduce su C_x en 1,7puntos, mientras que el tren 103 solo en 0,65. Es decir, la instalación de una barrera de esa altura resulta prácticamente igual de óptima para los dos modelos, pero para el tren 102 es mucho más eficaz, ya que en ausencia de barrera se ve más afectado por el viento lateral.

El mismo gráfico refleja que la altura óptima de la barrera a la que se hacía referencia, está acotada entre 1 y 2 m, ya que en esa franja se hacen cero todos los coeficientes de fuerza lateral (C_x), lo que es sinónimo de afectación lateral cero sobre el tren.

Esta conclusión es muy relevante y ya nos acota un rango de medidas, aunque habrá que realizar ensayos más en detalle que delimiten y corroboren o no esta conclusión, ya que hay que recordar que este ensayo se ha hecho con barreras de 0, 1, 2 y 3m, y por tanto las líneas son básicamente una aproximación lineal que une cuatro puntos.

De igual manera se puede observar que el empleo de barreras de más de 2m provoca coeficientes negativos, que en algunos casos pueden llegar a provocar el mismo efecto que sin protección con barrera pero de sentido contrario. Los trenes situados a sotavento son los más afectados por este efecto de succión que provoca que el tren se vea forzado por las depresiones a contraviento.

De igual forma se va a analizar la gráfica de variación del coeficiente de sustentación (C_y) en función de la altura de la barrera.

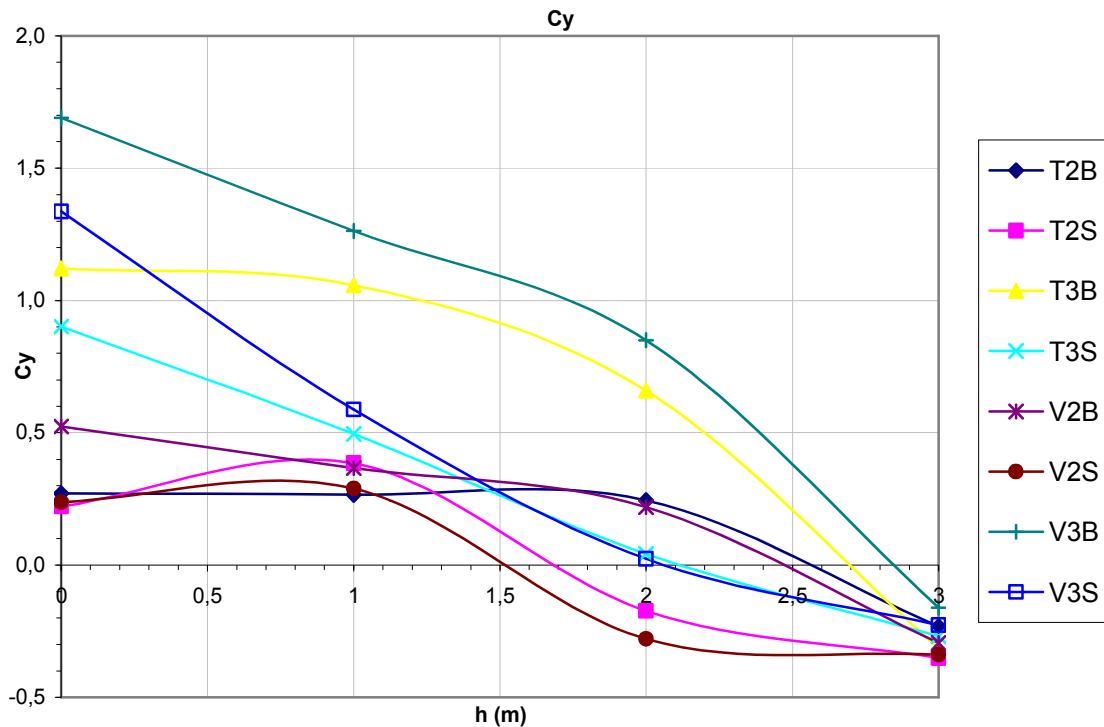


Gráfico 6.4: Variación de C_y en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios que constituyen el ensayo 1.

Este gráfico de C_y , da una idea de la afectación que el viento tiene sobre la sustentación, y aunque aclara poco de momento, si se puede concluir que al igual que pasaba con la afectación lateral, los efectos dinámicos sobre el tren en el eje vertical dependen mucho del tipo de escenario que se plantee, y por eso también será necesario un análisis más en detalle, aunque como ya se ha dicho no es lo más relevante del estudio.

Es por tanto preciso aclarar estos resultados y representarlos de una forma más estructurada que permita sacar más conclusiones y profundizar en este análisis. Usando los mismos gráficos antes expuestos, se va a comparar dos a dos mediante colores:

- Las diferencias de afectación sobre trenes 102 frente a la producida sobre trenes 103.
- Las diferencias de afectación sobre los trenes que circulan por la vía de barlovento frente a los que lo hacen por la vía de sotavento.
- Las diferencias de afectación sobre los trenes que circulan sobre terraplén frente a los que lo hacen sobre viaducto.

Se representarán los valores antes expuestos pero coloreados de tal forma que permitan sacar conclusiones de cada uno de estos tres puntos. Se seguirá este orden marcado a la hora de evaluarlos.

Comparación del tren 102 con el 103.

Los dos gráficos siguientes muestran como afecta el viento lateral en función del tren que se estudie. Coloreados en azul oscuro se encuentran las líneas que representan los valores de simulaciones realizadas con el tren 102, y en rosa las realizadas con el tren 103.

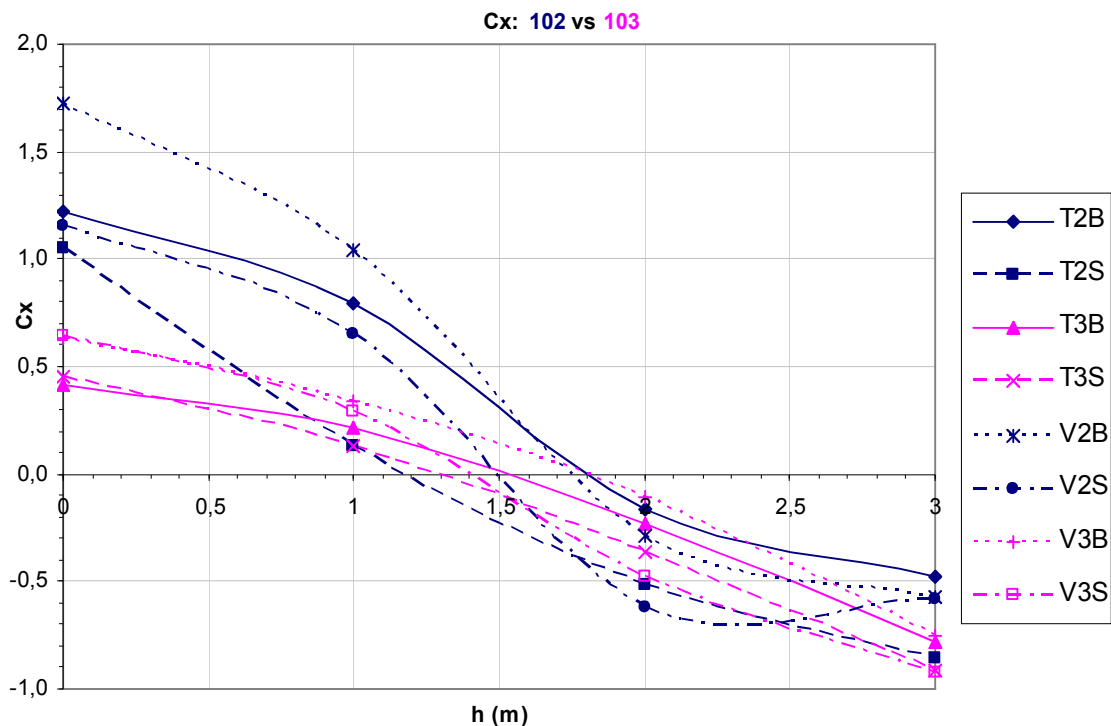


Gráfico 6.5: Variación de C_x en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos con tren 102 (líneas azul oscuro) y con tren 103 (líneas rosa)

Este gráfico así coloreado permite sacar más conclusiones sobre como afecta la forma del perfil transversal del tren en la dinámica frente a viento lateral. Se observa que, en ausencia de barreras y cuando estas son de baja altura, el tren 102 se ve mucho más afectado por el viento lateral que el 103. Esto implica que la instalación de barreras será más eficaz de cara a proteger al tren 102.

Para ilustrar esta afirmación, las siguientes figuras muestran que con altura de barrera cero, el tren 102, por su forma poco aerodinámica guía peor las líneas

de flujo, lo que provoca un estancamiento de estas que hace que aumente la presión y en consecuencia que el C_x sea mucho mayor.

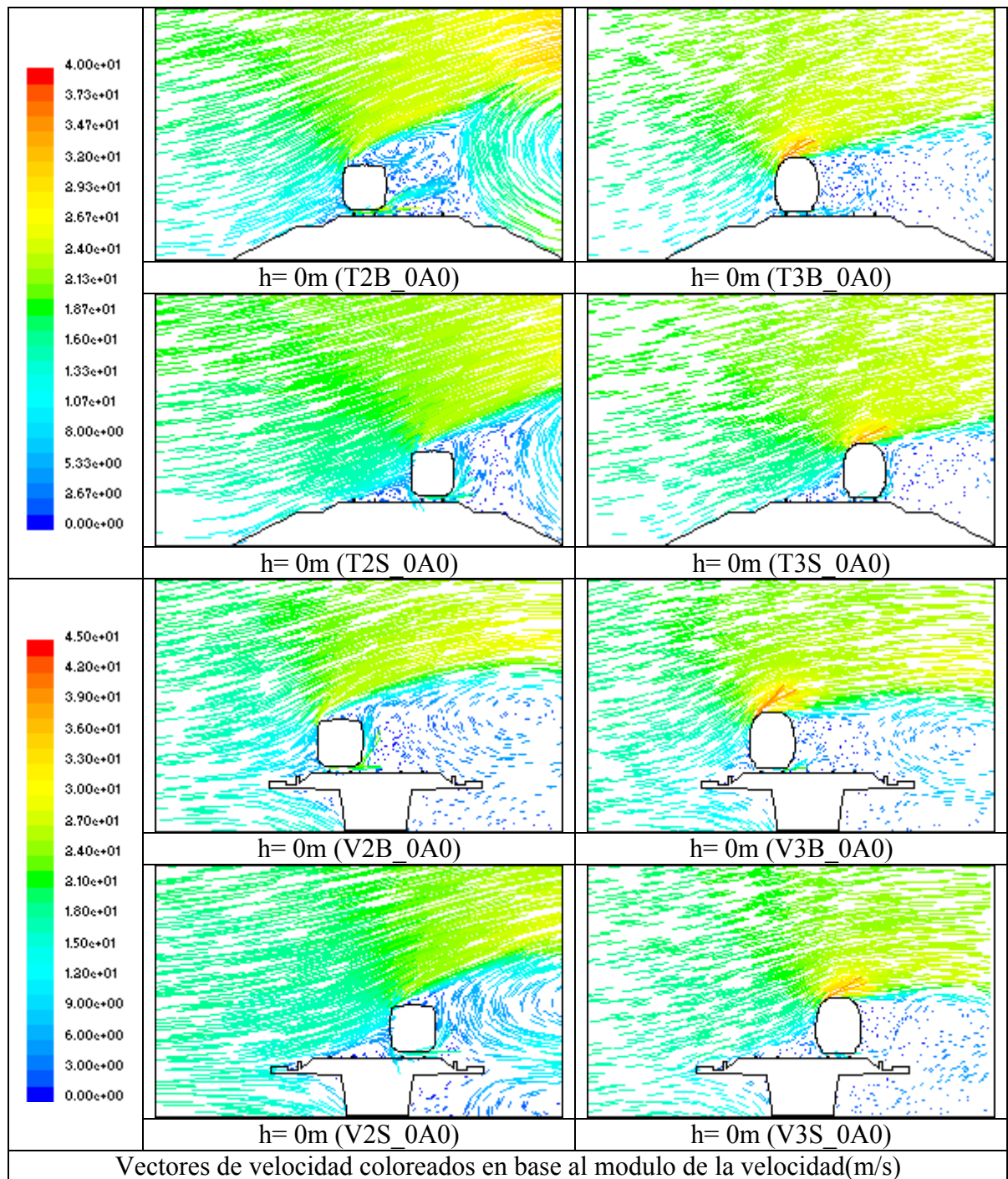


Tabla 6.5: Comparación de mapas de velocidades de diferentes simulaciones del ensayo 1.

Estas diferencias disminuyen y se hacen prácticamente cero a medida que las barreras van aumentando de altura y van desplazando las líneas de flujo por encima del techo del tren. Por tanto se puede decir que las alturas óptimas de las barreras son más o menos las mismas para las simulaciones que solo difieren en

el tipo de tren. La mayor diferencia entre alturas óptimas ($C_x=0$) se da para la configuración en terraplén a barlovento, y es de menos de 0,3 metros.

A continuación, y siguiendo el mismo patrón de colores para los diferentes modelos, se muestra el gráfico que representa la variación del coeficiente de sustentación, C_y .

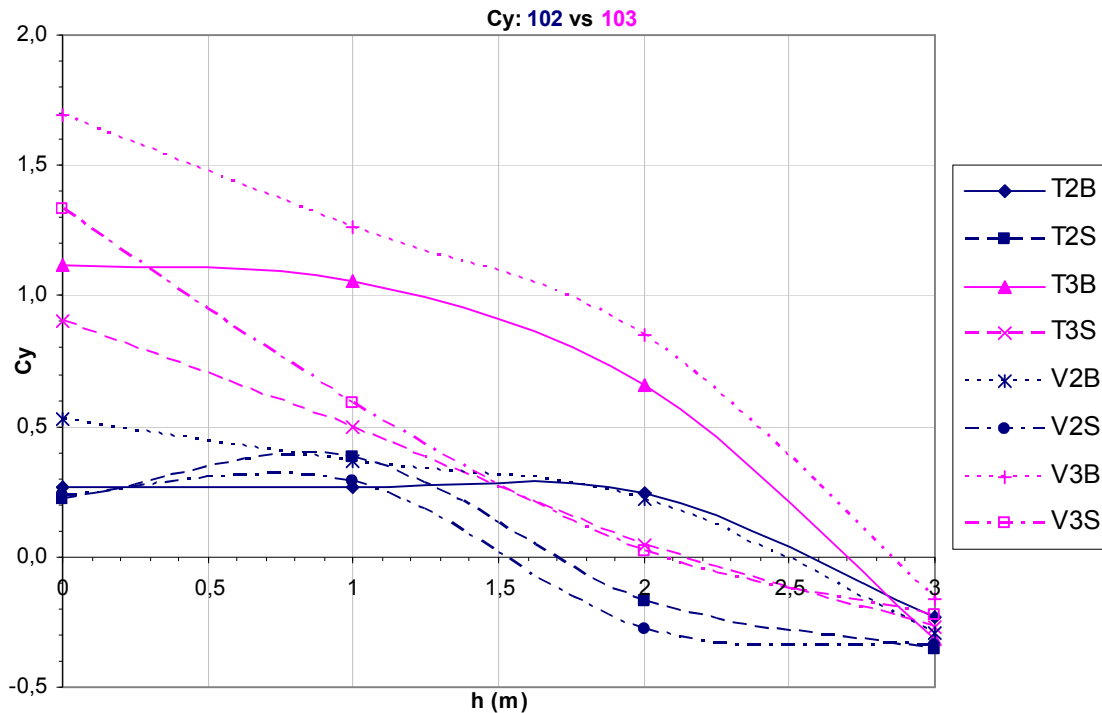


Gráfico 6.6: Variación de C_y en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos con tren 102 (líneas azul oscuro) y con tren 103 (líneas rosa)

Este gráfico así coloreado es muy representativo y claramente se puede observar que la forma aerodinámica del tren 103 provoca una fuerte sustentación en ausencia de barreras laterales. En cambio el tren 102 tiene muy poca afectación en cuanto a fuerzas verticales se refiere, y sus valores se mantienen más lineales.

Las imágenes presentadas en la anterior Tabla 6.5, sirven también para ilustrar estas diferencias. Al ser el 103 un tren con una forma redondeada en su parte alta, fuerza a que el aire pase muy rápido por su parte superior, y esta aceleración del aire crea una fuerte depresión que aumenta el efecto de la sustentación. Al aumentar la altura de la barrera va disminuyendo porque esta levanta las líneas de flujo forzando a que pasen por encima del tren, lo que se

consigue en torno a los dos metros para las vías de sotavento y tres metros en las de barlovento.

Se observa también que este efecto, de disminución de la sustentación a medida que crece la altura de la barrera, se produce en ambos trenes, si bien en el tren 103 lo hace de forma más brusca que en el tren 102, y en ambos la sustentación es menor en los trenes que circulan por la vía de barlovento. Estas diferencias entre los trenes que circulan por la vía de barlovento y los de sotavento serán estudiadas a continuación.

Comparación entre las vías de barlovento y sotavento.

Empleando el mismo método de contrastar con dos colores, se van a comparar las evoluciones de los coeficientes de trenes situados en las vías de barlovento, con trenes situados en las vías de sotavento, para determinar las diferencias entre ellos. De color rojo se representan los resultados de las simulaciones con trenes situados en la vía de barlovento, y en celeste las de trenes situados en la de sotavento.

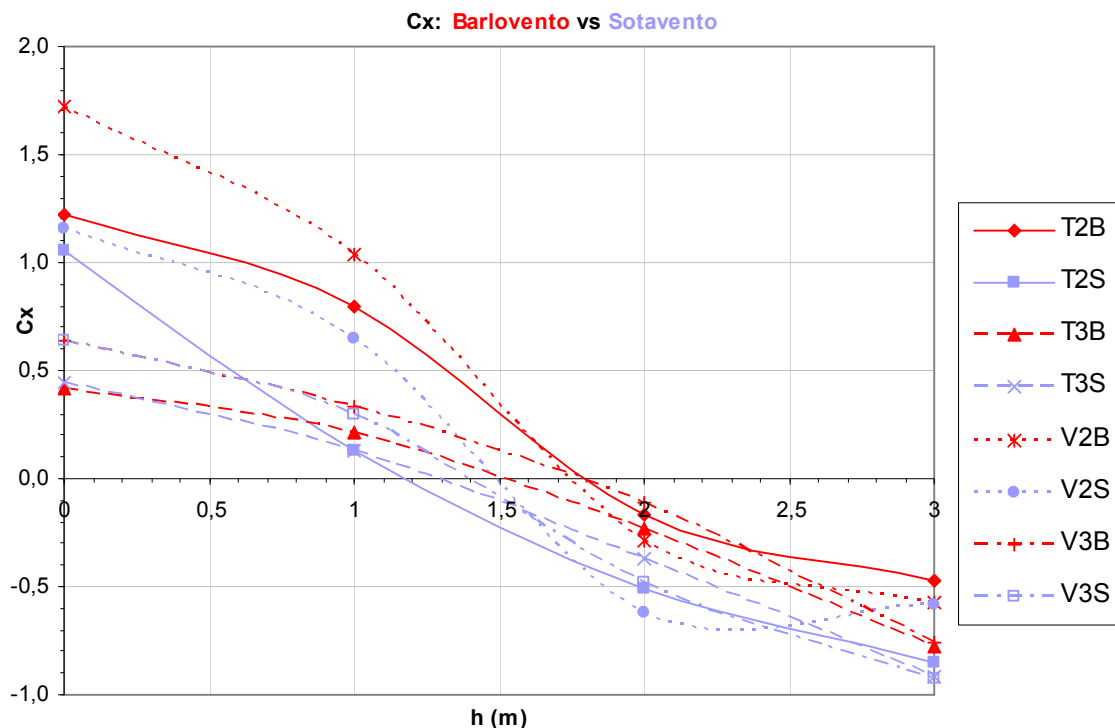


Gráfico 6.7: Variación de C_x en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos con tren situado en la vía de barlovento (líneas rojo) y con tren situado en la vía de sotavento (líneas celestes).

En lo que al coeficiente C_x se refiere, se puede observar que los trenes situados a sotavento (líneas celestes) requieren menos altura de barrera para llegar al óptimo. Además barreras óptimas para la vía de barlovento pueden resultar perjudiciales para el tren situado a sotavento, sobre todo para el caso de terraplén, donde las diferencias son mayores.

En las siguientes figuras se pueden ver algunos ejemplos que ilustran esto que se dice, claramente se puede observar que enfrente del tren situado a sotavento se forma una gran depresión cuando la barrera es alta que fuerza al tren en sentido contrario al viento. Esto se debe principalmente al amplio remolino que se crea entre la barrera y el tren, que produce una zona de bajas presiones, ocasionando que C_x sea negativo en algunos casos.

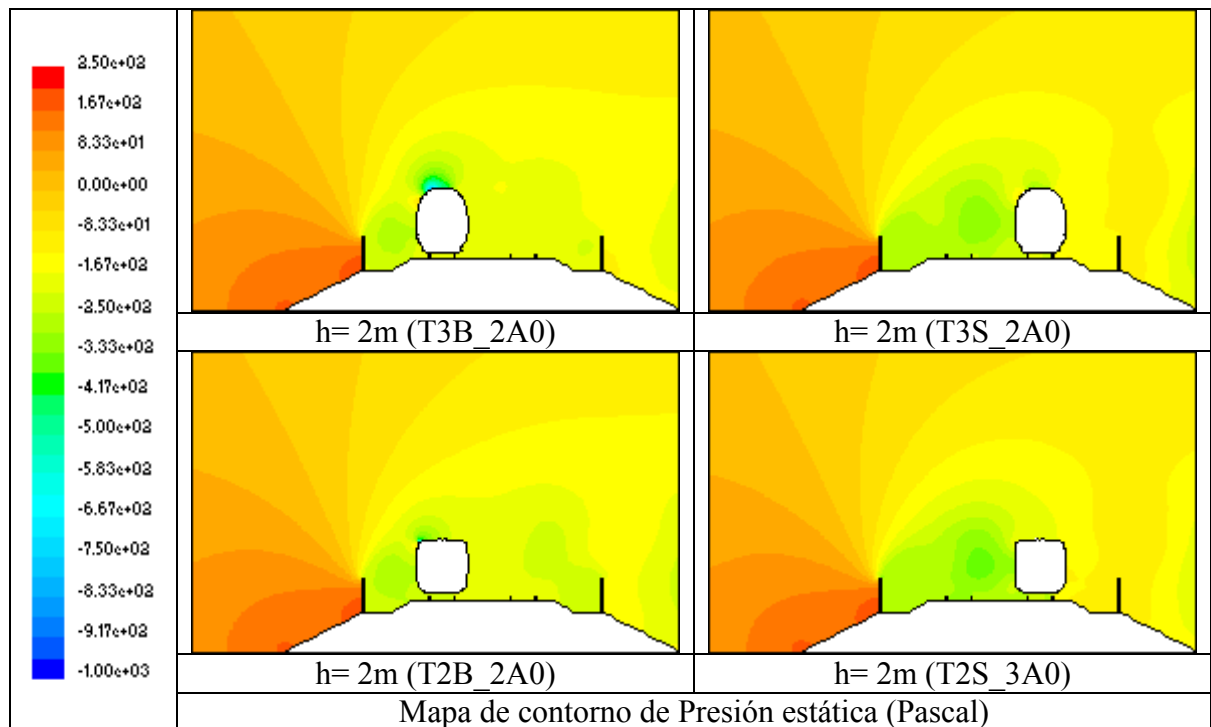


Tabla 6.6: Comparación de mapas de presiones de diferentes simulaciones del ensayo 1.

Como se puede observar la depresión más fuerte (zonas coloreadas de verde) es mucho mayor e intensa cuando el tren se sitúa en la vía de sotavento, y por tanto se produce un efecto contrario al deseado, el tren se ve forzado en el sentido contrario al viento.

Se puede decir que la situación en la vía de barlovento es la más restrictiva, porque todas las líneas rojas están por encima de sus correspondientes celestes, pero que hay que poner especial cuidado en el diseño

de barreras excesivamente altas que puedan afectar negativamente a los trenes situados a sotavento.

Se analiza con el mismo modelo de colores la gráfica que refleja los valores de C_y .

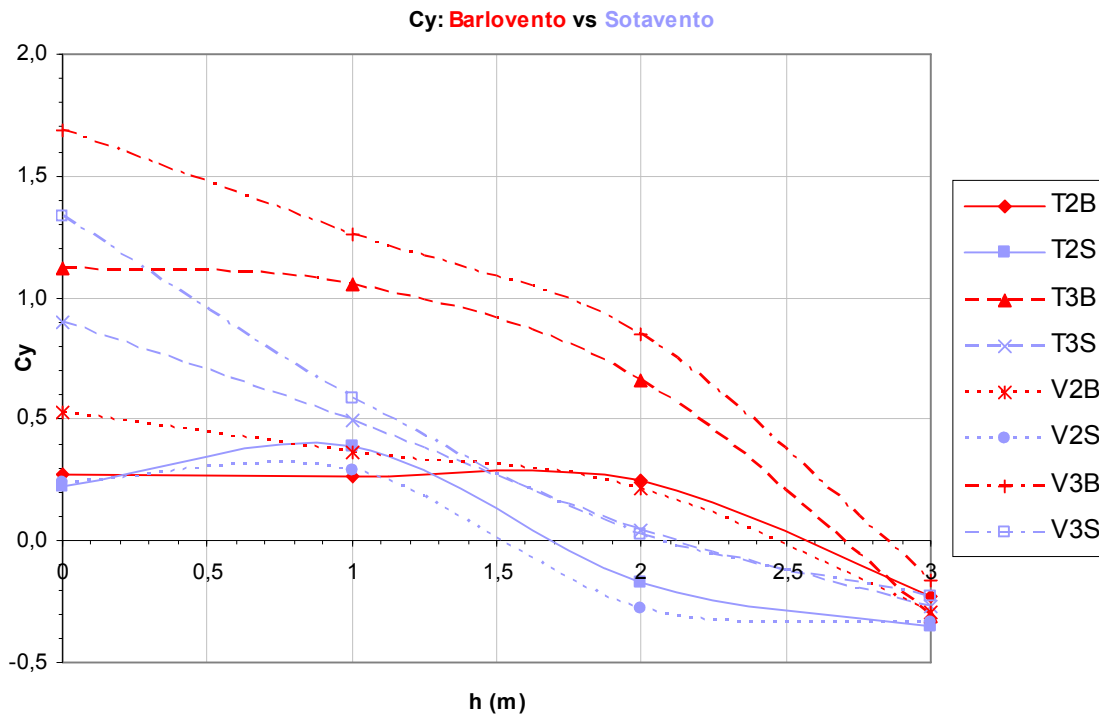


Gráfico 6.8: Variación de C_y en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos con tren situados en la vía de barlovento (líneas en rojo) y con tren situado en la vía de sotavento (líneas en celeste).

En este gráfico superior, se puede ver que, como ya se comentó cuando se comparaban los distintos tipos de trenes, la evolución del C_y de trenes situados a barlovento es muy diferente al de trenes situados a sotavento.

Recordar al lector que un descenso de C_y representa una mejora en la estabilidad, ya que supone que el tren es más “pesado” y por tanto menos vulnerable al viento, es decir, que conseguir con la instalación de las barreras descensos de C_y no hace sino aumentar algo más la estabilidad del tren.

Lo primero que salta a la vista es que las gráficas muestran variaciones diferentes (todas las curvas rojas poseen la misma forma, y con las celestes pasa algo parecido). Si se centra el estudio en la franja de alturas que va de 1 a 2 metros, para las vías a sotavento el C_y disminuye de forma más o menos

constante con la altura. Mientras que en el caso de las vías de barlovento la disminución más brusca se produce entre los dos y tres metros.

Si se considera que el óptimo de las barreras de cara al efecto lateral, que es el que se busca mitigar, se sitúa en principio entre los comentados 1 y 2 metros, es en esta franja donde se debe centra la atención de este análisis.

Para las vías de barlovento el C_y varía poco en esta franja, por lo que los efectos sobre la dinámica vertical serán considerables pero no importantes, y en el caso de que el tren sea el 102 se pueden considerar prácticamente despreciables.

En el caso de los trenes situados a sotavento, los acusados descensos de C_y no hacen más que mejorar la dinámica del tren, y constituyen un efecto secundario positivo de la instalación de las barreras de protección frente al viento lateral.

En resumen, los trenes situados a sotavento se ven más beneficiados con la instalación de barreras protectoras, ya que su C_x y C_y disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores.

Comparación entre las configuraciones de terraplén y viaducto.

Por último, y empleando el mismo método de representación bicolor, se van a comparar las evoluciones de los coeficientes de trenes situados sobre terraplén en terreno firme, con trenes situados sobre viaducto. De color naranja se representan los resultados de las simulaciones sobre terraplén y en verde las de viaducto.

Como es habitual, se va a comenzar comentando la gráfica de C_x que es la que contiene la información más relevante de cara a los objetivos que se buscan alcanzar con este proyecto.

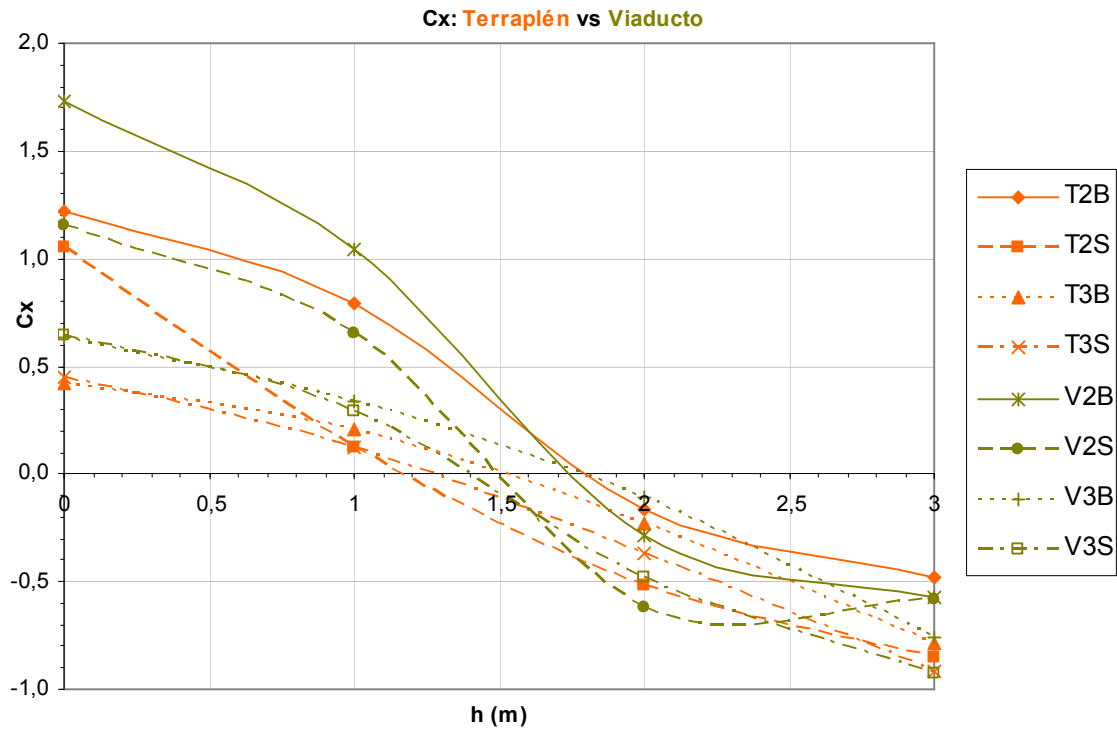


Gráfico 6.9: Variación de C_x en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos simulados sobre terraplén (líneas en naranja) y los simulados sobre viaducto (líneas en verde olivo).

Lo primero que salta a la vista es que para valores bajos de altura de barrera, las líneas verdes están siempre por encima de sus correspondientes naranjas. Esto quiere decir que en ausencia de protección, los trenes que circulan sobre un viaducto sufren más los efectos del viento lateral, y por tanto se harán más necesarias las medidas correctoras, algo que ya se había previsto y que confirma los resultados de otros trabajos recogidos en el estado del arte.

Los siguientes mapas de presión muestran como a igualdad del resto de parámetros y en ausencia de barreras, los trenes situados sobre viaducto están sometidos a presiones más elevadas que los situados sobre terraplén. Teniendo en cuenta que la escala no es la misma para viaducto y para terraplén, se observa claramente que las manchas de presiones alrededor del tren son más rojas y mayores cuando los trenes se simulan sobre viaducto.

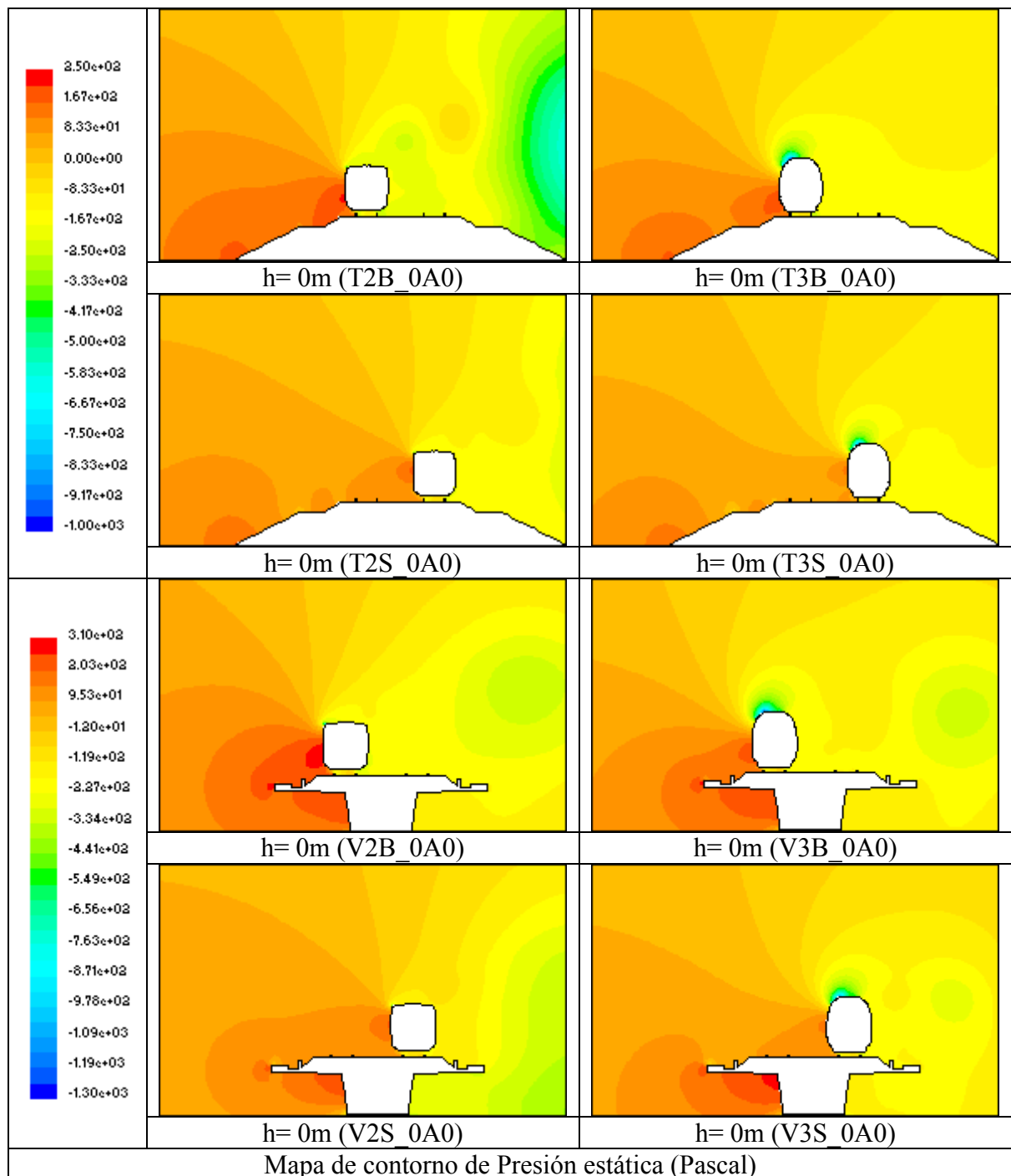


Tabla 6.7: Comparación de mapas de presiones de diferentes simulaciones del ensayo 1.

También se observa que las alturas óptimas de barrera (aquellas para las que C_x es cero) no es la misma para todos los casos similares, por ejemplo para el caso del tren 103 a barlovento, la altura óptima de barrera dista casi medio metro entre el caso de terraplén y el de viaducto.

Dado la forma que se ha hecho este ensayo, no se puede afirmar nada más, ya que solo se manejan cuatro medidas de altura de barrera para cada

simulación. Por ello se hace necesario esperar a observar los resultados de los siguientes ensayos para poder profundizar en el análisis.

El siguiente gráfico muestra los resultados representados del coeficiente de sustentación, C_y .

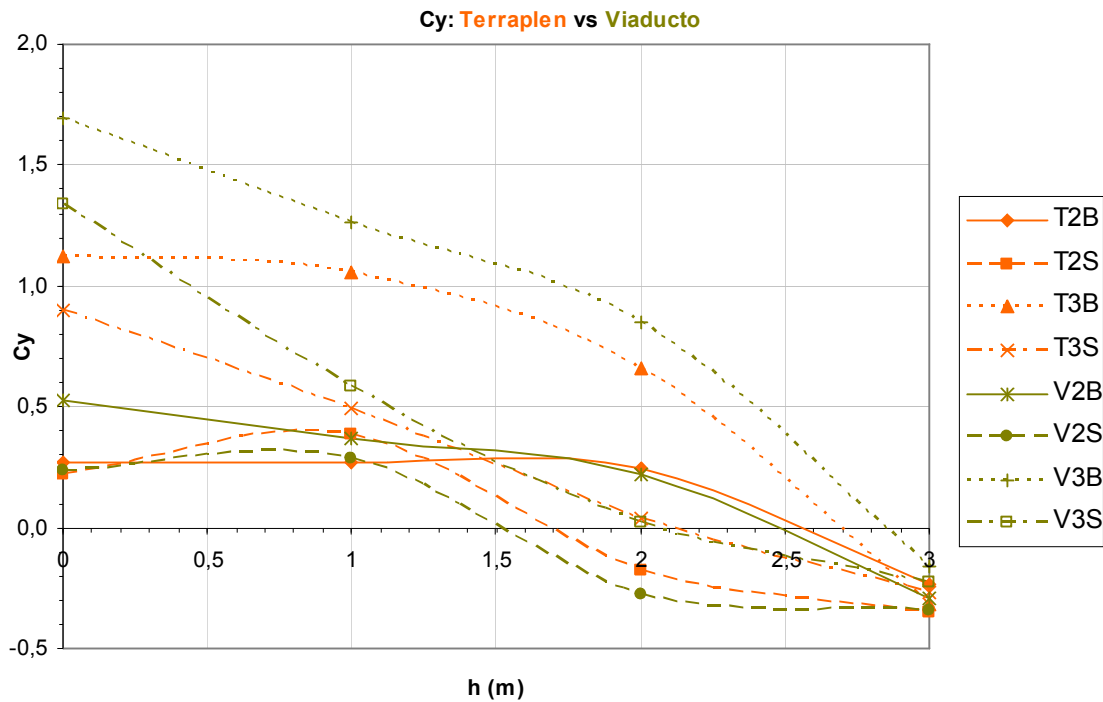


Gráfico 6.10: Variación de C_y en función de la altura de la barrera en los ocho escenarios del ensayo 1. Comparación entre los modelos simulados sobre terraplén (líneas en naranja) y los simulados sobre viaducto (líneas en verde olivo).

Se observa que las variaciones del coeficiente C_y entre las curvas de casos equivalentes son muy parecidas, tienen prácticamente la misma forma y acaban convergiendo a medida que crece la altura de la barrera.

Por tanto se puede afirmar que cuando la altura del parapeto es mayor de 1m las diferencias de C_y entre vías situadas en viaducto o en terraplén es prácticamente despreciable, como se aprecia claramente en el gráfico.

A continuación se recogen las valoraciones de esta comparación entre configuración en viaducto y terraplén, así como las valoraciones de las otras dos comparaciones anteriores.

6.1.3.4. VALORACIONES DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 1.

Como se ha dicho, partiendo del análisis general y de las tres comparaciones realizadas, se van a sacar algunas valoraciones particulares a modo de conclusiones del ensayo 1.

Lo primero decir que las condiciones y parámetros que definen los diferentes escenarios influyen claramente en los efectos que el viento lateral tiene sobre un determinado tren, y por eso se hace necesario comparar las diferentes alternativas para poder sacar conclusiones. Este ensayo se ha dividido en tres comparativas, se ha realizado el análisis en cada una de ellas, y ahora se van a sacar sus respectivas valoraciones.

Respecto al tipo de tren y su influencia frente a los efectos del viento lateral.

El hecho de que como se ha visto, en ausencia de barreras o cuando estas son de baja altura, el tren 102 se vea mucho más afectado por el viento lateral que el 103, implica que la instalación de barreras será más eficaz de cara a proteger al tren 102 que al 103, ya que las mejoras que se consiguen son mucho más apreciables.

Por otro lado la forma aerodinámica del tren 103 hace que el viento provoque una fuerte sustentación en ausencia de barreras laterales, que al final implica una fuerza contraria al peso, que aunque no parece muy importante comparada con el peso del tren, si puede, en combinación con la fuerza lateral, perjudicar a la estabilidad del ferrocarril.

Estas dos ideas tienen una lectura muy importante, y es que diseñar trenes como el 103 resulta más eficaz para luchar contra los efectos del viento lateral, ya que su perfil más aerodinámico mejora sus prestaciones, haciéndolo menos vulnerable, siempre y cuando su peso permita hacer despreciables los efectos de la sustentación.

A pesar de que es un tren algo más de medio metro más alto, sus curvas redondeadas hacen que su coeficiente de fuerza lateral en ausencia de barrera sea sensiblemente menor, lo cual es muy importante, ya que cabe pensar por tanto que el diseño de deflectores para su colocación sobre el tren 102 podría hacer que mejorara en parte su estabilidad frente al viento lateral.

Por otro lado las alturas óptimas de las barreras son más o menos las mismas para las simulaciones que solo difieren en el tipo de tren, por lo que cabe la posibilidad de que el tren no influirá de manera relevante a la hora de diseñar barreras eficaces, al menos en lo que a su altura óptima se refiere, pero esto es algo que debe confirmarse con nuevos ensayos.

Respecto a la situación del tren sobre vía de barlovento o de sotavento

Partiendo del análisis efectuado anteriormente, que se puede resumir en que: “los trenes situados a sotavento se ven más beneficiados con la instalación de barreras protectoras, ya que su C_x y C_y disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores”, se pueden sacar algunas conclusiones sobre este aspecto.

Para las vías de barlovento el C_y varía poco en la franja de alturas que recoge los valores óptimos, y por tanto se puede afirmar que los efectos sobre la dinámica vertical serán considerables pero no importantes, y en el caso de que el tren sea el 102 se pueden considerar prácticamente despreciables. En cambio si el tren se sitúa a sotavento, los acusados descensos de C_y mejoraran la dinámica del tren, y constituyen un efecto secundario positivo de la instalación de las barreras de protección frente al viento lateral.

Dado que los trenes situados a sotavento se ven más beneficiados con la instalación de barreras protectoras, ya que su C_x y C_y disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores, se puede decir que la situación en la vía de barlovento es la más restrictiva, por lo tanto se puede centrar el estudio en dicha vía.

Pero se debe considerar que a la hora de diseñar una determinada barrera habrá que comprobar que sus efectos sobre la vía de sotavento no sean tan perjudiciales como podrían llegar a serlo sin barrera. Si se configuran barreras demasiado altas solo con el objetivo de proteger al tren de barlovento, se pueden generar depresiones que perjudiquen al tren que circula por la vía de sotavento.

También se pueden desarrollar modelos de barreras que por sus características morfológicas logren mitigar este efecto de vacío que fuerza al tren en sentido contrario al viento.

Respecto a la infraestructura.

En ausencia de protección, los trenes que circulan sobre un viaducto sufren más los efectos del viento lateral, y por tanto se harán más necesarias las medidas correctoras, algo que ya que confirma los resultados de otros trabajos recogidos en el estado del arte.

Se puede afirmar que a la vista de los resultados parece que no se podrá tratar de igual manera el caso de vía sobre terraplén y sobre viaducto, y por tanto serán necesario dividir los sucesivos estudios en dos casos, ya que las medidas de mitigación parece que no van a ser exactamente las mismas en cuanto a altura de barrera óptima se refiere, pero será necesario un ensayo con mayor nivel de detalle para asegurar esta hipótesis.

En cambio el análisis también refleja que al contrario que con el coeficiente de fuerza lateral, para el coeficiente de sustentación apenas habrá diferencias en función de la infraestructura sobre la que circule el tren, y se mantiene valores casi constantes tanto en vía sobre viaducto como en terraplén.

A modo de resumen general de las valoraciones de este ensayo, decir que ha resultado muy útil para la determinación de las variables más influyentes en la afectación del viento lateral, y que ha servido como primer contacto para la especificación de las particularidades de los diferentes escenarios estudiados.

6.1.4.- ENSAYO 2: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA BARRERA PARA-VIENTO EN LOS EFECTOS DEL VIENTO LATERAL SOBRE DIFERENTES ESCENARIOS Y TRENES.

Con este ensayo se busca paliar una de las necesidades que ya han sido recogidas en los anteriores estudios, la de analizar con detalle la evolución de los coeficientes aerodinámicos cuando aumenta la altura de la barrera, para poder determinar con mayor exactitud las alturas óptimas de barrera en cada una de las situaciones para las condiciones de contorno planteadas.

6.1.4.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 2.

Los ensayos 0 y 1 se han completado en base a solo cuatro alturas de barrera cada uno. Con estos valores se puede interpolar una altura óptima de barrera como se ha hecho y observar a grandes rasgos la evolución de los coeficientes en función de la altura.

Los resultados del ensayo 1, que se realizó con modelos sin barreras y con barreras de 1, 2 y 3 metros, muestran que el óptimo para todos los modelos se situaba entre 1 y 2 metros, resultados que coinciden con los de otros trabajos recogidos en el capítulo 2 de este trabajo.

Pero con tan solo cuatro medidas no se pueden hacer afirmaciones tajantes, ya que hay que evaluar con mayor precisión todo el rango de valores de alturas, para así tener una mayor cantidad de datos que permitan dotar de mayor exactitud a las conclusiones que se formulen.

Los objetivos primordiales de este ensayo son:

- Obtener con precisión las alturas óptimas de barreras tipo A en cada uno de los escenarios, para que sirvan de base en el posterior desarrollo y optimización de estas.
- Confirmar si como se postuló en el ensayo 1, el tipo de tren influye mucho en la evolución de los coeficientes aerodinámicos, pero poco en la altura óptima de la barrera.
- Confirmar si el estudio sobre viaducto y terraplén son o no equivalentes, para en el caso de que así fuese dividir desde este momento su posterior estudio.

En resumen, con el objetivo de dotar a este proyecto de la mayor exactitud posible, de confirmar los resultados aproximados que se obtuvieron en anteriores ensayos, y sobre todo de afinar en un dato tan importante como la altura óptima de las barreras, se desarrolla este ensayo 2.

6.1.4.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 2.

A partir de los resultados y conclusiones que fueron deducidos del precedente ensayo 1, se van a plantear exclusivamente aquellos escenarios que han sido calificados como los más restrictivos.

Se van a realizar ensayos con trenes solamente situados a barlovento que como se vio es la situación más negativa. Habrá que tener en cuenta que una vez elegidos los óptimos de las barreras se deberá confirmar si lo son también para el tren a sotavento, teniendo especial cuidado en que no se consigan valores del coeficiente lateral negativos muy grandes.

En cuanto al material rodante se van a ensayar modelos con los dos tipos de trenes, el 102 y el 103, para confirmar realmente si como se vio en el ensayo 1 los óptimos de altura de barrera para situaciones equivalentes son válidos para los dos tipos de trenes.

Por tanto se van a simular cuatro escenarios, los que salen de combinar trenes 102 y 103 sobre terraplén y viaducto (exclusivamente en la vía de barlovento). En cada escenario se van a plantear seis alturas de barreras además de la altura cero (0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 y 3) lo que constituye un total de 7 simulaciones por escenario, es decir 28 simulaciones en total.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.	Bloque
Simulaciones con vía en Terraplén.	Tren TALGO 102	0	T2B_0A0	2.1
		0.5	T2B_0.5A0	
		1	T2B_1A0	
		1.5	T2B_1.5A0	
		2	T2B_2A0	
		2.5	T2B_2.5A0	
		3	T2B_3A0	
	Tren SIEMENS 103	0	T3B_0A0	2.2
		0.5	T3B_0.5A0	
		1	T3B_1A0	
		1.5	T3B_1.5A0	
		2	T3B_2A0	
		2.5	T3B_2.5A0	
		3	T3B_3A0	
Simulaciones con vía en Viaducto.	Tren TALGO 102	0	V2B_0A0	2.3
		0.5	V2B_0.5A0	
		1	V2B_1A0	
		1.5	V2B_1.5A0	
		2	V2B_2A0	
		2.5	V2B_2.5A0	
		3	V2B_3A0	
	Tren SIEMENS 103	0	V3B_0A0	2.4
		0.5	V3B_0.5A0	
		1	V3B_1A0	
		1.5	V3B_1.5A0	
		2	V3B_2A0	
		2.5	V3B_2.5A0	
		3	V3B_3A0	

Tabla 6.8: Simulaciones realizadas en el ensayo 2.

El anterior cuadro muestra las 28 simulaciones que se van a realizar, las marcadas en gris son las que están ya realizadas. Téngase en cuenta que los ensayos con ausencia de barrera y con barreras de 1, 2 y 3 metros de altura ya han sido realizados en iguales condiciones en los ensayos precedentes, y por tanto el ensayo 2 se reduce a hacer 12 simulaciones nuevas que se compararán con las realizadas anteriormente.

6.1.4.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 2.

De nuevo en el anexo C se presentan los mapas de presiones y de vectores de velocidad que se han obtenido en las simulaciones de este tercer ensayo. Para comparar mejor se incluyen todas las simulaciones que lo conforman, las 12 nuevas y las 16 repetidas.

Los mapas están divididos en los cuatro bloques señalados en el cuadro superior, y para facilitar su lectura, todos están representados en la misma escala de colores, que se incorpora a la izquierda del cuadro del anexo y rotulados debajo con su correspondiente nomenclatura.

Se realizará el análisis en base a los gráficos que recogen los valores de los coeficientes de C_x y C_y obtenidos en las simulaciones y expuestos en la Tabla C.28 del anexo C, y se complementarán con aquellas imágenes de mapas de presiones o de velocidades que se consideren relevantes para explicar algún concepto.

La siguiente gráfica presenta la variación del coeficiente de fuerza lateral o C_x para las 28 simulaciones que conforman este ensayo. Representadas en azul grisáceo están los valores correspondientes a las simulaciones con el tren 102 y en color violeta las realizadas con el tren 103. También se divide el estudio en simulaciones con los trenes sobre terraplén, representados con líneas continuas, y sobre viaducto, representados con líneas discontinuas.

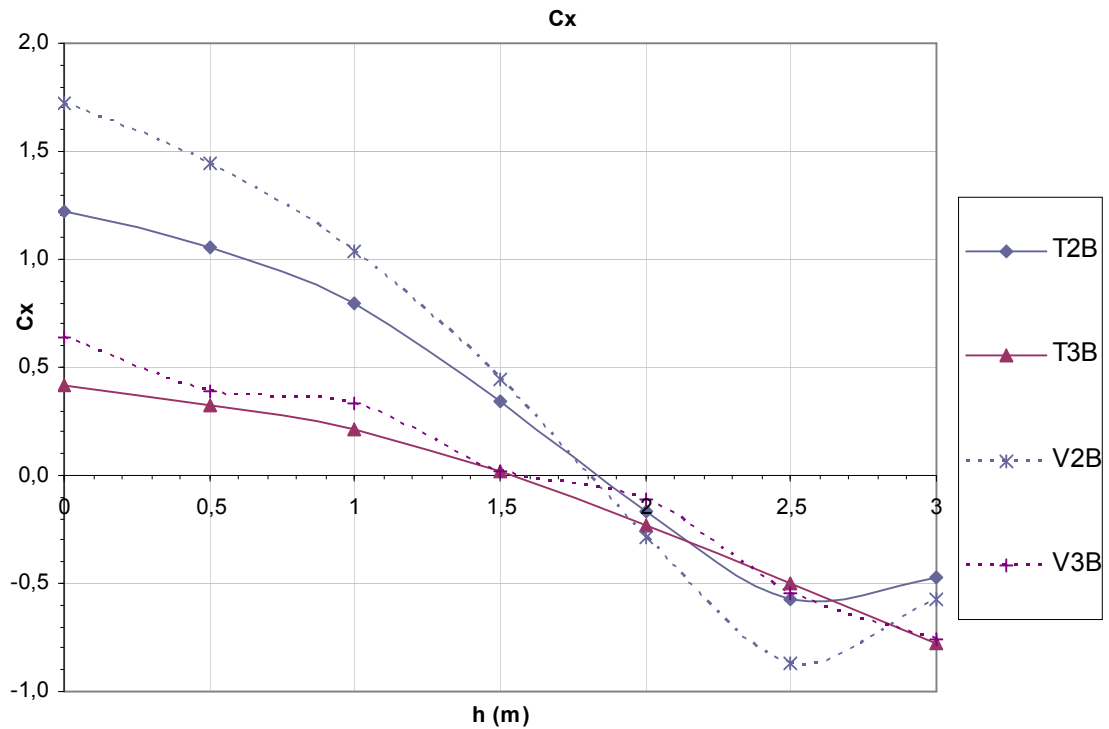


Gráfico 6.11: Variación de C_x en función de la altura de la barrera en los cuatro escenarios del ensayo 2. Comparación entre los modelos simulados con tren 102 (líneas azules) y con trenes 103 (líneas violetas) y entre los modelos situados sobre terraplén (líneas continuas) y los situados sobre viaducto (líneas discontinuas).

Claramente se puede apreciar como las curvas discontinuas que representan las vías en viaducto, para alturas de barrera bajas están por encima de las continuas, lo que refleja que la vía en viaducto está más afectada por el viento lateral que la de terraplén si no se protege frente al viento lateral. Este resultado corrobora los obtenidos en el ensayo 1.

Sin embargo el aumentar el detalle del análisis con más alturas de barrera, refleja que, a pesar de que las vías en viaducto están más afectadas por el viento lateral, para ambos trenes la altura óptima coincide tanto en vías sobre viaducto como en vías sobre terraplén.

Por otro lado existe una pequeña diferencia entre altura óptima de barrera para los diferentes tipos de trenes, para el tren 103 la altura óptima es de 1,5m, mientras que para el 102 estará entre el 1,5 y los 2 metros. Las siguientes figuras muestran los mapas de vectores velocidad para las alturas de barreras óptimas.

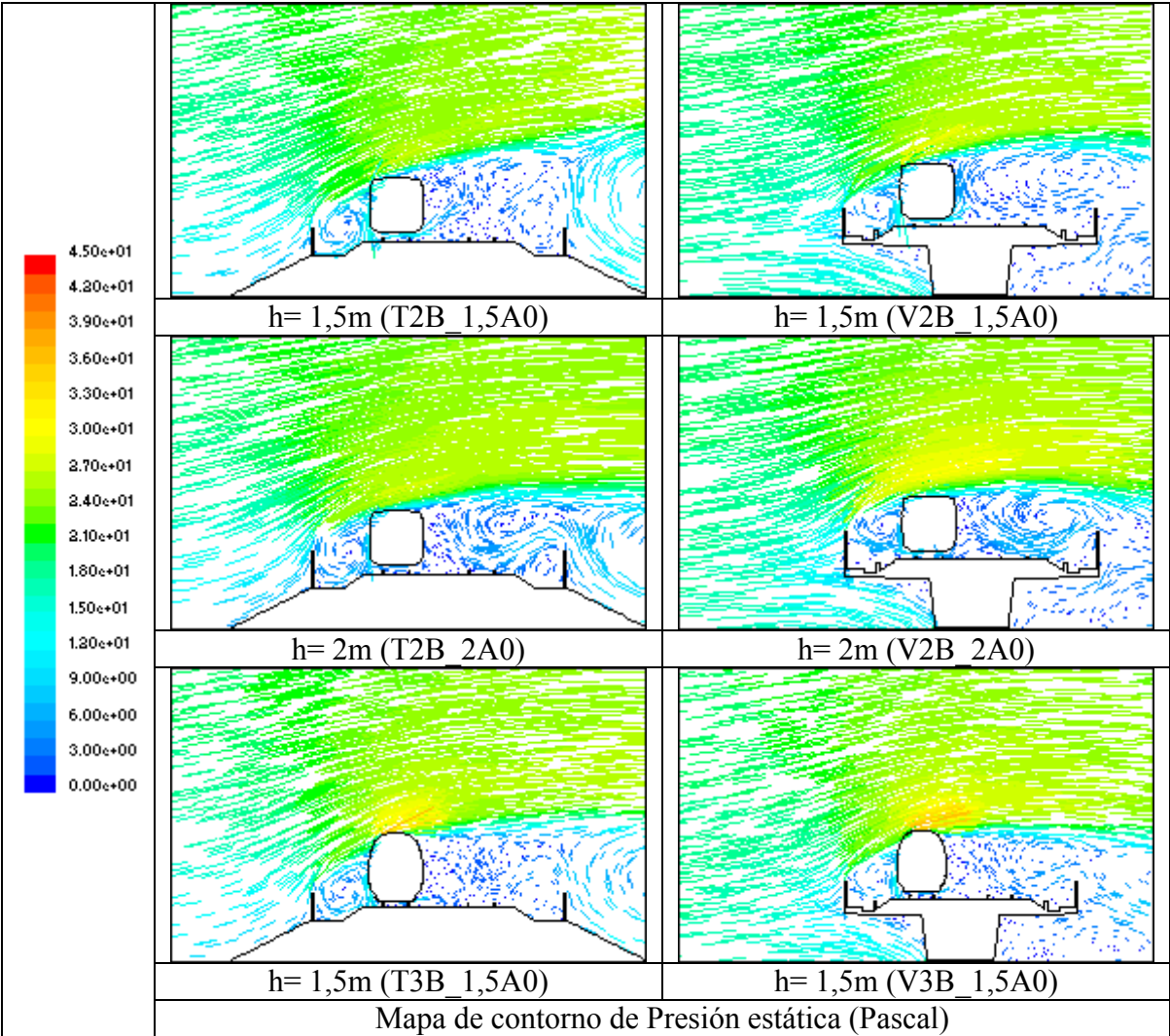


Tabla 6.9: Comparación de mapas de velocidades de diferentes simulaciones del ensayo 2.

Con estas imágenes se justifica porque para el tren 102 la barrera de 1,5m está cercana a ser la óptima pero no lo es. Se aprecia como la estela no consigue sobrepasar del todo al tren y golpea contra la parte alta de éste. En cambio con barreras de dos metros de altura, se ve como la barrera protege completamente al tren desplazando la estela por encima del techo.

En las figuras del tren 103 que están en la parte inferior del cuadro, se han representado los mapas con 1,5m de altura de barrera, que según los resultados numéricos es la óptima para este tren. Se aprecia que aunque la barrera no consigue que la estela lo sobrepase por completo, gracias al perfil aerodinámico del tren, las líneas de flujo están más guiadas, lo que disminuye la fuerza lateral sobre él.

El siguiente gráfico muestra la variación del coeficiente de sustentación o C_y en los distintos modelos planteados en este ensayo siguiendo el mismo criterio que para el gráfico de C_x .

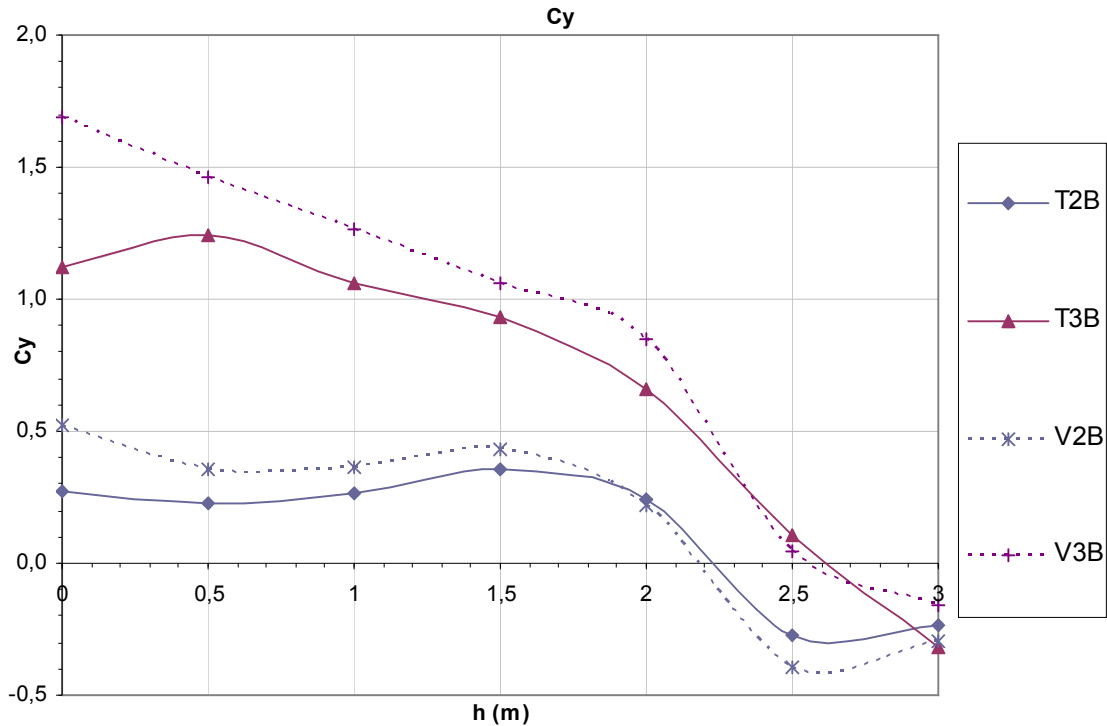


Gráfico 6.12: Variación de C_y en función de la altura de la barrera en los cuatro escenarios del ensayo 2. Comparación entre los modelos simulados con tren 102 (líneas azules) y con trenes 103 (líneas violetas) y entre los modelos situados sobre terraplén (líneas continuas) y los situados sobre viaducto (líneas discontinuas).

Una vez que se han acotado en un rango de medio metro los valores óptimos de altura de barrera, resulta más sencillo especificar la influencia que puede tener esta sobre el C_y .

En esta franja que nos ocupa los C_y adoptan valores muy diferentes en función del tipo de tren. Para el 103 son bastante elevados, pero sufren un importante descenso conforme crece la altura de la barrera, lo que mejorará su estabilidad.

Para el 102 se mantienen en prácticamente los mismos valores bajos que posee en ausencia de barrera, y por tanto la instalación de esta no influirá en su dinámica vertical.

En la tabla de imágenes anterior (Tabla 6.9) se apreciaba como la velocidad del aire justo por encima del tren 103 es muy alta, lo que provoca que la

presión sea baja y el consiguiente efecto de succión. En cambio en el tren 102, al tener formas más cuadradas, este efecto se deja notar mucho menos.

6.1.4.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 2.

Este ensayo 2 y su análisis permiten obtener una serie de valoraciones importantes de cara al futuro desarrollo de los siguientes ensayos, y que se exponen a continuación:

Como ya se predijo y se postuló con los resultados del ensayo 1, las barreras son mucho más necesarias en la configuración de vía sobre viaducto, aunque la altura óptima de barrera es la misma para el mismo tren situado a barlovento tanto en viaducto como en terraplén.

También se confirma que el tipo de tren es muy importante de cara a los efectos del viento lateral, siendo el tren 103 de perfil más aerodinámico, el que mejor se comporta frente al viento lateral en lo que a fuerzas laterales se refiere y por tanto la instalación de barreras es menos efectiva con este tren.

Sin tener en cuenta los efectos de sustentación, ambos trenes mejoran su estabilidad frente al viento lateral a medida que crece la altura de la barrera, pero el tren 102 lo hace de manera bastante más significativa, dado que sus resultados sin barrera son bastante peores.

En cambio el 103 tiene una importante sustentación, que habría que estudiar hasta que punto puede interferir en la dinámica de un tren que aunque como todos es significativamente pesado, pasa por ser de los más ligeros de Europa. Aunque la instalación de barreras la disminuye notablemente, también se pueden desarrollar y estudiar otras formas de barrera que puedan hacer mejorar esta sustentación sin perjudicar los valores de coeficiente lateral que son los realmente importantes.

En definitiva, para las condiciones de viento propuestas, la situación más restrictiva es la de vía en viaducto, que es la que más necesita de medidas correctoras, aunque a la luz de los resultados, las medidas correctoras que se propongan para viaducto pueden ser igual de válidas para vía en terraplén, aunque menos efectivas.

En cuanto al tren, el que se ve más afectado por los efectos de viento lateral es el tren 102, aunque habrán de tenerse muy en cuenta que el desarrollo de barreras eficaces para mejorar la circulación de este tren frente a viento cruzado, no deben perjudicar a la circulación del otro, ya que ambos comparten la misma infraestructura escogida como escenario de referencia para este proyecto.

6.1.5.- ENSAYO 3: EVALUACIÓN DE LA ALTURA ÓPTIMA OBTENIDA EN EL ENSAYO 2, EN CONDICIONES ESPECIALES.

Este ensayo no es sino un complemento del ensayo 2, para partiendo de sus resultados profundizar en el análisis. Con las alturas de barreras que daban una protección óptima, obtenida en el anterior ensayo, se busca estudiar el efecto de colocar barreras de estas alturas en condiciones especiales que no han sido estudiadas.

6.1.5.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 3.

Los resultados del ensayo 2 definían que la altura óptima de barrera era diferente en función del tipo de tren a proteger, exactamente se obtuvo que la altura óptima para proteger al tren 102 es aproximadamente 1,75m y para proteger al 103 bastaría con una barrera de 1,5m (para trenes situados en la vía de barlovento).

Hay que tener en cuenta que por las líneas de alta velocidad españolas, y en concreto la que ocupa este estudio, circulan estos dos tipos de trenes, por lo tanto, sería conveniente buscar una barrera que suponga una solución lo más equilibrada posible para ambos.

Además el análisis de ensayo 1 y sus valoraciones advertían del peligro de instalar barreras excesivamente altas, ya que podían perjudicar al tren situado en la vía de sotavento tanto como en ausencia de barrera.

Teniendo en cuenta estas dos consideraciones, surge la necesidad de plantear este ensayo que quiere estudiar los efectos de estas alturas de barreras que se ha considerado proporcionan una protección óptima para cada tren por separado, sobre el otro tren para el que la barrera no es óptima, y sobre trenes de los dos tipos situados a sotavento.

Además de planteará el estudio tanto en viaducto como en terraplén, buscando hacer el análisis lo más completo posible.

El principal objetivo de este ensayo es examinar si existe una altura de barrera que pueda llegar a ser una solución de compromiso, satisfaciendo todas las necesidades del material rodante, es decir, que mitigue los efectos del viento lateral en todos los trenes que circulen por la infraestructura, tanto por la vía de barlovento que es la más perjudicada, como por la de sotavento.

6.1.5.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 3.

En los dos escenarios de viaducto y terraplén, se van a ensayar con trenes situados en las vías de sotavento y barlovento. Esto hace un total de cuatro escenarios, si en cada uno de ellos se ensayan los dos trenes objeto del estudio se tienen ocho posibilidades, y si para cada uno de estas posibilidades se ensayan las alturas óptimas de barreras antes citadas, de 1,5m y de 1,75m, en total se tiene 16 simulaciones.

De este total de 16 simulaciones, solo 12 son nuevas, ya que los escenarios con barrera de 1,5m de altura y trenes situados a barlovento ya han sido simulados en el ensayo 2. De esta forma se puede analizar la influencia de las barreras óptimas, obtenidas en este ensayo, en el resto de escenarios que no han sido estudiados anteriormente.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren	Barlovento/Sotavento	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.	Bloque
Simulaciones con vía en Terraplén.	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	1,5	T2B_1,5A0	3.1
			1,75	T2B_1,75A0	
		Tren a sotavento	1,5	T2S_1,5A0	
			1,75	T2S_1,75A0	
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	1,5	T3B_1,5A0	3.2
			1,75	T3B_1,75A0	
		Tren a sotavento	1,5	T3S_1,5A0	
			1,75	T3S_1,75A0	
Simulaciones con vía en Viaducto.	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	1,5	V2B_1,5A0	3.3
			1,75	V2B_1,75A0	
		Tren a sotavento	1,5	V2S_1,5A0	
			1,75	V2S_1,75A0	
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	1,5	V3B_1,5A0	3.4
			1,75	V3B_1,75A0	
		Tren a sotavento	1,5	V3S_1,5A0	
			1,75	V3S_1,75A0	

Tabla 6.10: Simulaciones realizadas en el ensayo 3

El anterior cuadro marca las simulaciones que se van a realizar con su correspondiente nomenclatura y bloque a la derecha, y en gris están las que ya han sido simuladas en ensayos anteriores.

6.1.5.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 3.

El anexo C recoge los mapas de presiones y de vectores de velocidad que se han obtenido en las 16 simulaciones de este ensayo, representada en sus respectivos bloques. Además también se exponen los resultados obtenidos en este ensayo en forma de valores de C_x y C_y (Tabla C. 28)

En este caso el estudio de gráficas que representen estos resultados resultaría menos útil, ya que solo se han considerado dos alturas de barrera. Por ello para el análisis de los resultados de este ensayo se emplearán métodos numéricos, como la siguiente tabla que muestra los valores de los coeficientes aerodinámicos C_x y C_y , ordenados para permitir una mejor visualización de algunas primeras ideas analizables.

Vía en terraplén con barrera de 1,5m de altura				
	C_x		C_y	
	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
102	0,34700244	-0,18527573	0,35920246	0,19798113
103	0,01909744	-0,10220435	0,92933386	0,24850221

Vía en viaducto con barrera de 1,5m de altura				
	C_x		C_y	
	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
102	0,44691866	-0,33237093	0,43101605	0,09777864
103	0,02105198	-0,20597387	1,05819772	0,29066205

Vía en terraplén con barrera de 1,75m de altura				
	C_x		C_y	
	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
102	0,02604401	-0,35300418	0,41776632	0,02336856
103	-0,0991616	-0,25439509	0,82741458	0,14590414

Vía en viaducto con barrera de 1,75m de altura				
	C_x		C_y	
	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
102	0,05872068	-0,44172735	0,49597238	-0,07284915
103	-0,08780179	-0,3053788	0,81455579	0,14909277

Tabla 6.11: Coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 3.

Esta tabla recoge los valores de C_x y de C_y para lo que se han considerado, según el ensayo 2, como condiciones óptimas de altura de barrera para el tren situado a barlovento, es decir, con barreras de 1,5m de altura (óptimas para el tren 103) y de 1,75m de altura (óptimas para el 102). Estos valores que marcan el óptimo son prácticamente cero, y son los que están señalados en celeste para facilitar su visualización.

Claramente se aprecia que las condiciones de altura de barrera que son óptimas para un determinado tren situado en barlovento, no lo son para el mismo tren situado a sotavento ni mucho menos para un tren diferente situado en cualquier otra posición de vía. Este efecto se hace más notable cuando se consideran los esfuerzos laterales representados por C_x .

En todos los casos de trenes situados en la vía de sotavento, aparecen coeficientes C_x negativos, que significan que los efectos perjudiciales del aire se invierten a causa de la depresión que crea la barrera tras de sí, provocando que el tren se vea forzado a contraviento.

El estudio de estos valores sin compararlos con los valores en ausencia de barrera resulta improductivo, ya que aunque sean negativos pueden ser menores que los que soportaría el tren en ausencia de barrera. Por ello se va a realizar una comparación teniendo en cuenta los valores obtenidos en el ensayo 1 con simulaciones sin barreras de protección.

La siguiente tabla muestra los valores de C_x y C_y para las simulaciones realizadas sin barreras de protección:

Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
T2B_0A0	0	1,2194927	0,27030495
T3B_0A0	0	0,4168899	1,1207186
V2B_0A0	0	1,7261739	0,52442495
V3B_0A0	0	0,63444976	1,6906995
T2S_0A0	0	1,0539936	0,22118506
T3S_0A0	0	0,44817865	0,90142777
V2S_0A0	0	1,1548073	0,23752558
V3S_0A0	0	0,64327294	1,3365603

Tabla 6.12: Valores de C_x y C_y en las simulaciones sin barreras de protección frente al viento lateral.

Una vez planteados estos valores, ya se tiene una base para poder comparar y estudiar el grado de beneficio de las soluciones óptimas en aquellas situaciones en las que no lo son. Lo que se ha hecho ha sido plantear el grado de

eficacia de las medidas en porcentajes, es decir, el tanto por ciento de mejora respecto a la situación inicial en ausencia de barrera.

Para ello la fórmula que ha sido empleada en cada uno de los ocho escenarios ha sido:

$$\text{Eficacia}(\%) = \frac{C_0 - |C_h|}{C_0} \times 100 \quad (6.1.5.1)$$

Donde C_0 es el valor de C_x o C_y cuando la altura de barrera es cero (Expuesto en la Tabla 6.11), y C_h es el valor de C_x o C_y que se quiere comparar, es decir, con una altura de barrera h dada.

Empleando esta ecuación 6.1.5.1 que permite comparar cada situación con su correspondiente punto de partida, se puede comparar que soluciones son las que aportan un mayor grado de eficacia, o beneficio, en tanto por ciento.

La siguiente tabla muestra los resultados de emplear la fórmula anterior con los coeficientes laterales (C_x). Sombreados en rojo se muestran los diferentes promedios, considerados para los mismos tipos de tren, para los situados en la misma vía, y en negrita el total, que nos da una idea del beneficio global de las medidas de protección estudiadas.

Evaluación de la eficacia con barreras de 1,5m de altura para C_x							
Modelos sobre terraplén				Modelos sobre viaducto			
	Barlov.	Sotav.	Promedio		Barlov.	Sotav.	Promedio
Tren 102	71,55	82,42	76,98	Tren 102	74,11	71,22	72,66
Tren 103	95,42	77,19	86,31	Tren 103	96,68	67,98	82,33
Promedio	83,48	79,81	81,65	Promedio	85,40	69,60	77,50

Evaluación de la eficacia con barreras de 1,75m de altura para C_x							
Modelos sobre terraplén				Modelos sobre viaducto			
	Barlov.	Sotav.	Promedio		Barlov.	Sotav.	Promedio
Tren 102	97,86	66,51	82,19	Tren 102	96,60	61,75	79,17
Tren 103	76,21	43,24	59,73	Tren 103	86,16	52,53	69,34
Promedio	87,04	54,87	70,96	Promedio	91,38	57,14	74,26

Tabla 6.13: Evaluación porcentual de la eficacia de las barreras, considerando los valores de los coeficientes C_x calculados en el ensayo 3.

Esta tabla así planteada si permite realizar un análisis más intuitivo que las anteriores. Se va a comenzar desgranando un poco la información contenida en ella:

- Para los trenes situados a barlovento, la barrera de 1,5m de altura es menos eficaz en términos globales, que la de 1,75m. Pero si el tren se sitúa en la vía de sotavento la barrera de 1,5m es significativamente más efectiva, ya que la barrera de 1,75m reduce notablemente la eficacia en los trenes situados en la vía de sotavento.
- En cuanto al tipo de tren, el 102 alcanza la protección óptima en vía de barlovento con barreras de 1,75m, pero con barreras de menor altura también tiene un comportamiento bueno en cuanto a protección lateral. En cambio el tren 103 es más sensible a variaciones de su altura óptima de barrera, y la eficacia de estas sobre dicho tren disminuye al emplear la barrera de 1,75m.
- Para el caso de vía en terraplén, la diferencia de 10 puntos entre la barrera de 1,5m y la 1,75m, parece que es más que suficiente para decir que la altura más eficaz en términos globales es la de 1,5m, a la luz de los resultados obtenidos.
- En cambio en viaducto esta diferencia no es tan marcada, aunque también es la barrera de 1,5m la más eficaz.

En general se puede afirmar que en caso de tener que elegir entre una altura u otra, la barrera de 1,5m de altura resulta más apropiada en términos globales, en base a los resultados obtenidos en el ensayo.

Haciendo lo mismo para los valores del coeficiente de fuerza vertical C_y , se puede construir una tabla semejante:

Evaluación de la eficacia con barreras de 1,5m de altura para C_y							
Modelos sobre terraplén				Modelos sobre viaducto			
	Barlov.	Sotav.	Promedio		Barlov.	Sotav.	Promedio
Tren 102	-32,89	10,49	-11,20	Tren 102	17,81	58,83	38,32
Tren 103	17,08	72,43	44,75	Tren 103	37,41	78,25	57,83
Promedio	-7,91	41,46	16,78	Promedio	27,61	68,54	48,07

Evaluación de la eficacia con barreras de 1,75m de altura para C_y							
Modelos sobre terraplén				Modelos sobre viaducto			
	Barlov.	Sotav.	Promedio		Barlov.	Sotav.	Promedio
Tren 102	-54,55	89,43	17,44	Tren 102	5,42	69,33	37,38
Tren 103	26,17	83,81	54,99	Tren 103	51,82	88,85	70,33
Promedio	-14,19	86,62	36,21	Promedio	28,62	79,09	53,86

Tabla 6.14: Evaluación porcentual de la eficacia de las barreras, considerando los valores de los coeficientes C_y calculados en el ensayo 3.

Teniendo en consideración que los valores del coeficiente C_y no resultan tan importantes como los de C_x , se procederá a la evaluación de los puntos más relevantes:

- Lo primero es que sobre el tren 102 situado a sotavento, se obtienen valores negativos, es decir, que el efecto de sustentación aumenta con la instalación de las barreras. Cabe destacar que solo se produce este efecto sobre el tren 102.
- En el resto de los casos los valores de C_y mejoran con la instalación de barreras, sobre todo para los trenes situados a sotavento, que en conjunto se ven más favorecidos, en cuanto a la dinámica vertical se refiere, que los situados a barlovento.
- En lo referente al tipo de tren, es el 103 el que mayores mejoras experimenta, pero también hay que tener muy en cuenta, que como se vio en anteriores apartados, y en la Tabla 6.12 los valores de C_y en ausencia de barreras para el tren 103 son mucho mayores.
- Si se comparan viaducto y terraplén, la mejora global resulta más eficaz para los trenes que circulan sobre viaducto, y esta mejora si es importante dado que al contrario que pasaba con el tipo de tren, los valores en ausencia de barrera en viaducto si son menores que sobre terraplén a igualdad del resto de condiciones.

En general se puede decir que la eficacia medida sobre el coeficiente C_y es muy dispar, pero también se ha de tener en cuenta que los valores de partida (con altura de barrera cero) son también muy dispares.

6.1.5.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 3.

Como ya se había planteado en el ensayo 1, se puede afirmar sin riesgo a equivocarse que las condiciones de altura de barrera que son óptimas para un determinado tren situado en barlovento, no lo son para el mismo tren situado a sotavento ni mucho menos para un tren diferente. Incluso en muchos de los casos, la barrera crea depresiones, que provocan que el tren se vea forzado a contraviento.

El hecho de que para los trenes situados a barlovento, la barrera de 1,5m de altura sea menos eficaz, en términos globales, que la de 1,75m daría que pensar que la elección de una altura de barrera mayor daría mejores resultados.

Pero en base a los resultados de este ensayo se puede decir que esto no es cierto. Si el tren se sitúa en la vía de sotavento la barrera de 1,5m es significativamente más eficaz que la barrera de 1,75m.

Esto se debe fundamentalmente al efecto antes comentado, una barrera de mayor altura crea una depresión en su cara de sotavento (interna a la vías del tren) que provoca que el tren se vea forzado a contraviento, y aunque en términos globales su protección mejora frente a la situación sin barrera, empeora frente a una situación con una barrera de menor altura. El siguiente dibujo muestra un poco este efecto con un ejemplo que representa lo que sucede (los valores no son reales de ningún modelo, son una simple aproximación a modo de ejemplo):

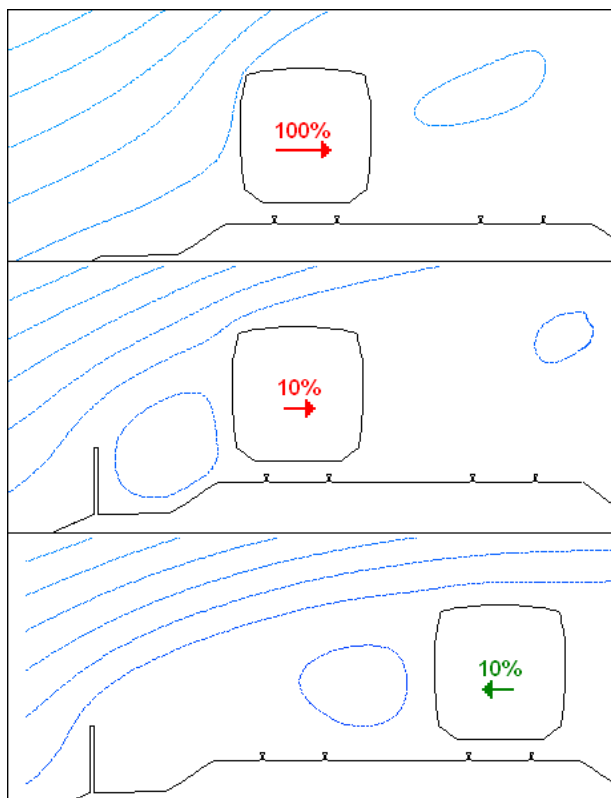


Imagen 6.8: Ejemplo del efecto que se crea en la vía de sotavento protegidas con barreras.

En la primera imagen el tren se enfrenta al viento lateral sin barrera, y se considera la fuerza lateral que sufre como el 100% que puede afectarle en ese modelo.

Al colocar una barrera de cierta altura esta afectación disminuye notablemente, haciendo que el tren se encuentre más protegidos frente al viento. Ahora bien, si se mantiene la barrera y se lleva al tren a la vía de sotavento, la afectación ha cambiado de sentido, y aunque es de bajo valor absoluto existe.

Sucede entonces que la vía de barlovento responde muy bien ante la colocación de barreras protectoras, pero en la vía de sotavento los resultados no son tan buenos como cabría esperar.

Por lo tanto no se puede centralizar el estudio en la vía de barlovento. Uno de los planteamientos para futuros ensayos ha de ser el de experimentar con distintos tipos de barreras que puedan mitigar este efecto sin hacer menos eficaz la barrera en la vía de barlovento, que como ya se vio, era la más perjudicada por los efectos del viento lateral.

Otra observación importante es que el tren 103, a pesar de tener un diseño más eficaz a la hora de contrarrestar los efectos del viento lateral, es más sensible a cambios en la altura de barrera que es óptima para protegerlo.

Si se une esto a lo anterior, se tiene que el diseño de barreras simples como las estudiadas hasta ahora, que puedan llegar a ser 100% eficaces para proteger todas las circulaciones de la línea de alta velocidad planteada parece muy difícil, pero si se puede llegar a plantear una solución de compromiso, o buscar barreras de diferentes morfologías que puedan contrarrestar algunos de los efectos que provocan esta pérdida de efectividad, que en algunos casos es muy importante.

En cuanto a la diferencia entre vía en terraplén y en viaducto se tiene idéntica situación, si bien es cierto que para terraplén parece que los resultados de la barrera de 1,5m de altura son bastante satisfactorios, lo que indica que no habría que hacer muchas mejoras en esta medida protectora.

En cambio en viaducto no hay tanta diferencia entre las dos barreras estudiadas, aunque como se ha dicho, la barrera de 1,5m es la más eficaz. Una mejora en la eficacia de las barreras sobre el tren situado a sotavento permitiría mejorar claramente la protección en viaducto, que aún está lejos de ser óptima con los resultados hasta ahora obtenidos.

En cuanto a los efectos verticales se pueden realizar algunas valoraciones también. En general la eficacia medida sobre el coeficiente C_y es muy dispar, pero también los valores de partida (medidos con altura de barrera cero) son bastante dispares.

Como se vio en el análisis, sobre el tren 102 situado a sotavento, se obtienen valores negativos, tanto en vía en terraplén como en viaducto, como este efecto solo se produce sobre el tren 102, y es algo que no ayuda a que la estabilidad vertical del tren aumente, habrá que estudiar con más detalle el porqué se produce y a partir de la causa analizar si se pueden buscar medios para intentar mitigarlo, barreras de formas diferentes, acoples en el tren tipo deflectores, etc.

En todos los demás casos los valores de C_y mejoran con la instalación de barreras, sobre todo para los trenes situados a sotavento, que en conjunto se ven más favorecidos, en cuanto a la dinámica vertical se refiere, que los situados a barlovento. Esto es un punto a tener en cuenta, ya que cualquier disminución de C_y se traduce en un aumento de la estabilidad, aunque sea muy ligero comparado con el peso del tren.

Como se intuía en anteriores ensayos, es el tren 103 el que mayores mejoras experimenta en este sentido al instalar barreras protectoras de 1,5m y 1,75m, pero esta gran mejora hay que ponerla en relieve, teniendo en cuenta que los valores de C_y en ausencia de barreras para el tren 103 son mucho mayores, es decir, las medidas para-viento resultan más eficaces porque en gran parte el margen de mejora es mucho mayor.

Aún así es algo a tener en cuenta, como ya se vio anteriormente, el estudio de la forma del tren 103 pueda dar las claves para una posible mejora del diseño del tren 102, de manera que se pueda hacer más efectivo frente al viento lateral, tanto en lo que respecta a efectos laterales como a los verticales.

Si se comparan los efectos verticales marcados por el coeficiente C_y entre las vías sobre terraplén y sobre viaducto, los resultados que se obtienen son muy parecidos a los ya comentados en el ensayo 1.

Hablando en términos de mejora global las barreras estudiadas resultan más eficaces para los trenes que circulan sobre viaducto, lo que puede suponer una pequeña ventaja que puede llegar a equiparar las condiciones en terraplén (que teniendo en cuenta solo C_x eran más favorables) con las condiciones en vía en viaducto.

Por lo tanto en lo que a dinámica vertical se refiere se pueden sacar dos conclusiones fundamentales: La barrera de 1,75m es algo más eficaz desde este

punto de vista, y que la efectividad de instalar barreras en viaducto es mayor comparada con la instalación de estas en terraplén (desde el punto de vista única y exclusivamente de la dinámica vertical).

Como valoración principal de todo el ensayo decir que parece que si el tren se sitúa sobre terraplén lo más adecuado es optar por barreras de 1,5m, aunque la efectividad no es perfecta, y se podrán buscar otro tipo de medidas de mitigación que puedan dar mejores resultados.

En cuanto a la vía en viaducto, es más necesario seguir buscando mediadas protectoras, ya que los resultados con las medidas propuestas hasta ahora aún no son tan satisfactorios como en terraplén, y se deben buscar soluciones que mejoren estas circunstancias, sobre todo que mitiguen el efecto vacío que provoca que el tren a sotavento se vea forzado a contraviento.

6.1.6.- ENSAYO 4: EVALUACIÓN DE LA ALTURA DE BARRERA ÓPTIMA OBTENIDA EN EL ENSAYO 3, CON SIMULACIONES DE DOS TRENES.

Este es el último ensayo de los llamados previos de evaluación. Se plantea a partir de la necesidad de tapar una de las carencias que tienen los ensayos realizados hasta ahora en este proyecto y en los trabajos anteriores al respecto recogidos en El Estado del Arte.

Con la altura de barreras que de momento ha dado los mejores resultados se van a ensayar escenarios con dos trenes simultáneamente, uno en la vía de barlovento y otro en la de sotavento.

6.1.6.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 4.

En todos los trabajos que han sido consultados y que están recogidos en el estado del arte, no se han realizado ensayos que comparen la influencia de medidas de mitigación de los efectos del viento lateral cuando sobre una misma infraestructura se cruzan dos trenes.

Esto se debe sobre todo a que con simulaciones en túnel de viento, que son las que se han empleado mayoritariamente hasta ahora para tratar estos problemas, no es posible abordar el ensayo que simule el cruce de dos trenes de alta velocidad, ya que estudiar el flujo alrededor de cuerpos en movimiento resulta aún muy complejo mediante este tipo de simulaciones, se necesitarían túneles de

viento muy largos y mecanismos capaces de hacer mover los modelos a escala, o el suelo, a grandes velocidades.

En cuanto a los análisis en CFD que han empezado a realizarse en los últimos años, realizar este tipo de simulaciones es muy complejo, ya que para obtener unos resultados completos sería necesario plantear un análisis en tres dimensiones, que permitiera reflejar la velocidad del tren, y esto no es común.

Como es lógico el efecto que producen dos trenes al cruzarse a altas velocidades debe ser realmente muy relevante, pero con el método de trabajo que se emplea normalmente en CFD, y que se está usando en este proyecto, de modelos bidimensionales, resulta imposible simularlo. Para estudiarlo correctamente se necesitaría un modelo tridimensional, con dos trenes lo suficientemente largos como para poder representar el instante de cruce y obtener valores reales.

Con los medios informáticos de los que disponemos para la realización de este proyecto resultaría inverosímil plantearse estos cálculos, es más, resultarían prácticamente imposibles incluso para los computadores más potentes.

Contando con esta limitación y teniendo muy en cuenta que los datos que se extraigan pueden estar muy alejados de la realidad, se plantea el ensayo con vistas a aprovechar los modelos y escenarios planteados hasta ahora con el objetivo de obtener unos resultados previos que en un futuro puedan emplearse para ser comparados con resultados reales medidos en la propia infraestructura.

6.1.6.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 4.

Se van a simular diferentes escenarios en los que coincidirán dos trenes a la vez. Todos los modelos se van a plantear con la misma barrera, la sencilla tipo A de altura 1,5m, que hasta ahora ha sido con la que se han obtenido los mejores resultados.

Para configurar los modelos se van a considerar los dos tipos de trenes ya definidos, combinándolos en parejas teniendo en cuenta su disposición en vía de barlovento o de sotavento. Esto da un total de cuatro combinaciones posibles:

Vía de Barlovento	Vía de sotavento
TALGO 102	TALGO 102
TALGO 102	SIEMENS 103
SIEMENS 103	TALGO 102
SIEMENS 103	SIEMENS 103

Si estas cuatro combinaciones posibles se trasladan a vía sobre terraplén y vía sobre viaducto, dan un total de 8 modelos, que serán los que constituyan el grupo a simular en este ensayo. La siguiente tabla muestra las simulaciones que se van a realizar, con las características de cada una, su nomenclatura de seguimiento y su bloque para clasificar los resultados en el Anexo C.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren en vía de barlovento	Tipo de tren en vía de sotavento	Nomenclatura del ensayo	Bloque
Simulaciones con vía en terraplén	TALGO 102	TALGO 102	T22_1,5A0	1
		SIEMENS 103	T23_1,5A0	
	SIEMENS 103	TALGO 102	T32_1,5A0	
		SIEMENS 103	T33_1,5A0	
Simulaciones con vía en viaducto	TALGO 102	TALGO 102	V22_1,5A0	2
		SIEMENS 103	V23_1,5A0	
	SIEMENS 103	TALGO 102	V32_1,5A0	
		SIEMENS 103	V33_1,5A0	

Tabla 6.15: Simulaciones realizadas en el ensayo 4.

6.1.6.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 4.

Teniendo en cuenta que como se ha dicho, los resultados pueden no ser semejantes a los reales, se va proceder a realizar un análisis general que permita una posterior interpretación de los datos obtenidos con las ocho simulaciones que conforman el ensayo.

Como en anteriores ensayos, en el anexo C se encuentra la tabla con los resultados numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en las ocho simulaciones (Tabla C. 37), así como los mapas de presiones y de vectores de velocidad que se han obtenido, ordenados en los bloques ya definidos por la Tabla 6.15.

Lo primero es que a efectos prácticos, aunque son solo ocho simulaciones, se obtienen datos de dos trenes por simulación, con lo que es como si se hubieran realizado 16 simulaciones en cuanto a volumen de datos acumulados de los coeficientes.

Siguiendo la línea de estudio marcada en este trabajo, lo que más puede interesar es ver las diferencias que se producen cuando a un tren se le sitúa en la vía de al lado el mismo tren u otro, siempre teniendo en cuenta que solo se pueden sacar conclusiones considerando que la situación planteada es con ambos trenes estáticos.

Para esta comparación se van a emplear los valores del ensayo 3 en los que el tren se presentaba solo, en las configuraciones de terraplén y de viaducto y en las vías de barlovento y sotavento, y con la misma altura de barrera de 1,5m. La siguiente tabla muestra los valores de C_x y C_y que serán usados para comparar con los valores obtenidos en el ensayo 4:

Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
T2B_1,5A0	1,5	0,3470024	0,3592025
T2S_1,5A0	1,5	-0,1852757	0,1979811
T3B_1,5A0	1,5	0,0190974	0,9293339
T3S_1,5A0	1,5	-0,1022044	0,2485022
V2B_1,5A0	1,5	0,4469187	0,4310160
V2S_1,5A0	1,5	-0,3323709	0,0977786
V3B_1,5A0	1,5	0,0210520	1,0581977
V3S_1,5A0	1,5	-0,2059739	0,2906621

Tabla 6.16: Valores de C_x y C_y en las simulaciones con barrera de 1,5m de protección frente al viento lateral obtenidos en los ensayos 2 y 3.

Lo que se va a hacer es comparar estos resultados anteriores con los del ensayo 4, es decir se van a observar las diferencias en la afectación del viento lateral, al situar en la misma infraestructura un tren en la otra vía, si el tren estudiado antes estaba en la de barlovento, el nuevo se situará en la de sotavento y a la inversa.

Para facilitar esta comparación se ha construido dos tablas, una para el coeficiente C_x y otra para el C_y , donde se compararán las diferentes situaciones. La segunda columna muestra los resultados del tren solo, y la tercera y la quinta los resultados sobre el mismo ferrocarril cuando se le sitúa al lado de otro igual o diferente.

Las columnas cuarta y quinta muestran un pequeño calculo que permite observar de forma muy intuitiva si esta nueva situación con dos trenes perjudica o favorece al tren que se está estudiando, y en que medida. No es más que la diferencia de los valores absolutos de los dos resultados que se comparan.

Se presenta y analiza primero la tabla correspondiente a los valores del coeficiente de fuerza horizontal C_x :

Valores del coeficiente de fuerza horizontal C_x					
Tren 102 a Barlovento	Solo 2B	Con 102 a Sotavento(22)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Sotavento(23)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,347	0,410	-0,063	0,407	-0,060
Viaducto	0,447	0,424	0,023	0,505	-0,058
Tren 103 a Barlovento	Solo 3B	Con 102 a Sotavento(32)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Sotavento(33)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,019	0,031	-0,012	-0,003	0,016
Viaducto	0,021	0,079	-0,058	0,035	-0,014
Tren102 a Sotavento	Solo 2S	Con 102 a Barlovento(22)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Barlovento(32)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	-0,185	-0,015	0,170	-0,096	0,089
Viaducto	-0,332	-0,031	0,302	-0,189	0,143
Tren 103 a Sotavento	Solo 3S	Con 102 a Barlovento(23)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Barlovento(33)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	-0,102	-0,044	0,058	-0,053	0,049
Viaducto	-0,206	-0,019	0,187	-0,149	0,057

Tabla 6.17: Valores de C_x obtenidos en el ensayo 4 y procesados para el análisis.

A la vista de los datos, se pueden resaltar a primera vista dos puntos muy importantes:

- Según los datos reflejados en la tabla superior, cuando se está estudiando un tren a barlovento, el que se situó otro tren a sotavento afecta muy poco al comportamiento del tren estudiado. Las diferencias son en todos los casos del orden de centésimas, lo que los hace despreciables dado el nivel de precisión empleado.
- Si lo que se estudia es la modificación en la afectación sobre el tren a sotavento cuando se le coloca un tren en la vía de barlovento los resultados muestran que se produce una mejora.

Si se centra el análisis en este último punto que es el realmente relevante, y se estudia con detenimiento los resultados, se aprecia que esta mejora se debe a que los coeficientes, que en todos los casos son negativos, reducen su valor absoluto respecto a la situación sin tren a barlovento.

Esto se debe a que la situación de un obstáculo, en este caso otro tren, entre la barrera y el ferrocarril a sotavento, reduce la depresión que provoca que el tren se vea forzado a contraviento.

Este efecto es mucho más notable para los casos de vía en viaducto, ya que si la vía está sobre terraplén la depresión es menor, y por tanto la colocación de un tren en la vía de barlovento produce mejoras, pero no tan significativas. Tan solo en el caso de tren 102 a barlovento y a sotavento se producen mejoras significativas sobre el situado a sotavento en el caso de vía en terraplén.

Se va a centrar el análisis en la configuración de vía sobre viaducto, que es donde se obtiene los resultados más interesantes. Las siguientes figuras de vectores de velocidad permiten explicar lo que sucede de una forma gráfica.

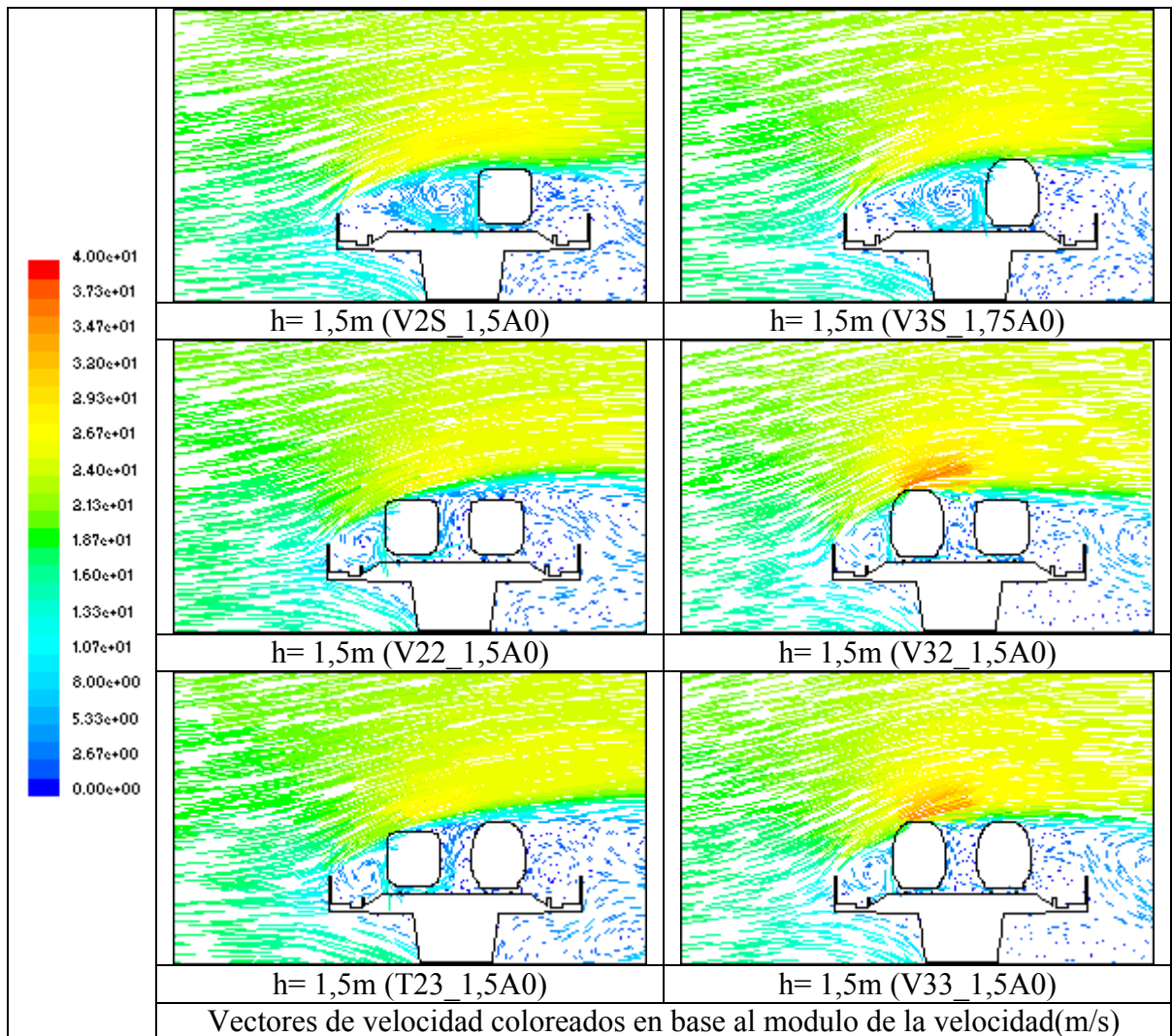


Tabla 6.18: Comparación mediante mapas de vectores de velocidad de diferentes escenarios de los ensayos 3 (dos imágenes superiores) y 4 (imágenes inferiores).

Como se aprecia claramente en las imágenes, y en los datos antes presentados, el situar un tren en la vía de barlovento reduce el remolino que se formaba entre el de sotavento y la barrera en ausencia de dicho tren, lo que favorece que no se forme una depresión tan acusada y que el segundo no se vea forzado a contraviento.

Esto es lo que provoca que el tren a sotavento tenga mejores resultados, no el hecho de que el tren se vea más protegido por el de barlovento, sino el que el remolino que se forma entre tren y barrera desaparece, provocando que la situación del tren a sotavento sea neutra, es decir, casi no se ve forzado ni en el sentido del viento ni en contra (C_x próximos a cero).

El tren 102 colocado a barlovento es el que mejores resultados da como elemento de protección, su forma cuadrada levanta más la estela impidiendo que se forme un remolino amplio entre los trenes. Por ejemplo si se compara cualquier situación con el tren 102 a barlovento, con las del 103 a barlovento, se ve que los resultados para cualquiera que sea el tren en vía de sotavento mejoran.

A continuación se pasa a analizar los aspectos más relevantes de los resultados del coeficiente C_y .

Valores del coeficiente de fuerza vertical C_y					
Tren 102 a Barlovento	Solo 2B	Con 102 a Sotavento(22)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Sotavento(23)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,359	0,294	0,065	0,303	0,056
Viaducto	0,431	0,435	-0,004	0,459	-0,028
Tren 103 a Barlovento	Solo 3B	Con 102 a Sotavento(32)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Sotavento(33)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,929	0,913	0,016	0,892	0,037
Viaducto	1,058	0,118	-0,060	0,948	0,110
Tren102 a Sotavento	Solo 2S	Con 102 a Barlovento(22)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Barlovento(32)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,198	-0,032	0,166	0,019	0,179
Viaducto	0,098	-0,015	0,083	0,086	0,012
Tren 103 a Sotavento	Solo 3S	Con 102 a Barlovento(23)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)	Con 103 a Barlovento(33)	Diferencia: Mejor(+) Peor(-)
Terraplén	0,249	-0,038	0,211	0,069	0,179
Viaducto	0,291	0,069	0,222	0,158	0,133

Tabla 6.19: Valores de C_y obtenidos en el ensayo 4 y procesados para el análisis.

Los valores de diferencia de la mitad superior del cuadro son todos próximos a cero. Esto refleja que como pasaba con el coeficiente C_x , el colocar un tren a sotavento tiene una afectación prácticamente nula sobre el situado a barlovento.

Por tanto se vuelve a fijar la atención en los trenes situados a sotavento y por tanto en las modificaciones que sufren al situar un tren a barlovento. Como se aprecia en todos los casos se consiguen mejoras al situar un tren delante. Salvo en el caso de dos trenes 103, en todas las demás posibles combinaciones, se reduce el efecto de sustentación de forma notable, y se adquieren valores próximos a cero.

Esto se debe fundamentalmente a que el situar un tren en la vía de barlovento, este eleva la estela muy por encima del situado a sotavento, lo que implica que el viento no pasa tan rápido por la parte alta de este último y se reduce la sustentación. Además un tren delante protege al posterior de que el viento pase también por debajo, lo que igualmente redundaría en una disminución de la sustentación.

Si se estudia el caso de dos trenes 103, que es la excepción porque es el único en el que la sustentación no llega a ser cero (aunque si es baja comparada con valores sin barrera), y se observa su diagrama de vectores de velocidad que se recoge en la Tabla 6.18, se entiende fácilmente porque la sustentación no llega a ser cero.

El perfil redondeado del 103 hace que las líneas de flujo no se “despeguen” del tren tanto como en otros casos, y además como es un poco alto, provoca que por el 103 situado a sotavento pasen también muy próximas y con grandes velocidades las líneas de flujo, lo que como ya se explicó provoca que la presión sea baja en la parte alta del tren y que aumente la sustentación.

Aún así los valores de C_y en todos los casos son lo suficientemente bajos como para afirmar que el colocar un tren en la vía de barlovento reduce a casi cero la sustentación sobre el tren a sotavento.

6.1.6.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 4.

Antes de comenzar a exponer algunas valoraciones y conclusiones sobre el análisis precedente, hay que volver a recalcar que las conclusiones solo serán

validas en un modelo estático, y que en ausencia de datos reales con los que comparar, no se puede garantizar de ninguna forma que las valoraciones aquí expuestas sean comparables a las que podrían obtenerse con resultados reales.

A partir del análisis que se ha centrado en comparar la influencia del estudio de una vía con dos trenes respecto a una vía con un tren, se pueden sacar una serie de valoraciones sobre las variaciones en la afectación de cada uno de los trenes.

Respecto a la afectación tanto horizontal (C_x), como vertical (C_y), el análisis deja bastante claro que el hecho de que por una vía circulen a la vez dos trenes, no repercute en la estabilidad ni en la protección frente al viento lateral del tren situado en la vía de barlovento, es decir, para este tren la presencia de otro en la vía de sotavento es prácticamente irrelevante a tales efectos.

En cambio cuando es el tren que se sitúa en la vía de sotavento el que se está estudiando, la presencia de otro en la vía de barlovento si produce cambios importantes en la afectación lateral por viento de éste.

Hasta aquí se puede decir que estas dos afirmaciones se podrían haber hecho antes de realizar el estudio, pues parece obvio que el situar otro tren entre el estudiado y el lugar de donde sopla el viento favorecerá siempre al tren protegido, y hará que los efectos del viento lateral sobre él se vean mitigados. La gran aportación del estudio no ha sido estas dos afirmaciones, sino el comprobar el porqué el tren situado a sotavento mejora su afectación lateral.

Los datos y el posterior análisis muestran que esta mejora se debe fundamentalmente a que los coeficientes, que son de signo negativo, disminuyen su valor absoluto, es decir, cuando no existe tren en la vía de barlovento el de la de sotavento se ve forzado a contraviento (de ahí que el signo sea negativo), y esta fuerza desaparece al situar el otro tren entre la barrera y él.

El tren de la vía de barlovento actúa como un obstáculo que rompe el remolino que se crearía entre tren y barrera impidiendo que se forme la depresión que lo fuerza a contraviento. La siguiente figura muestra a modo de ejemplo lo que sucede con valores aproximados a los de los modelos.

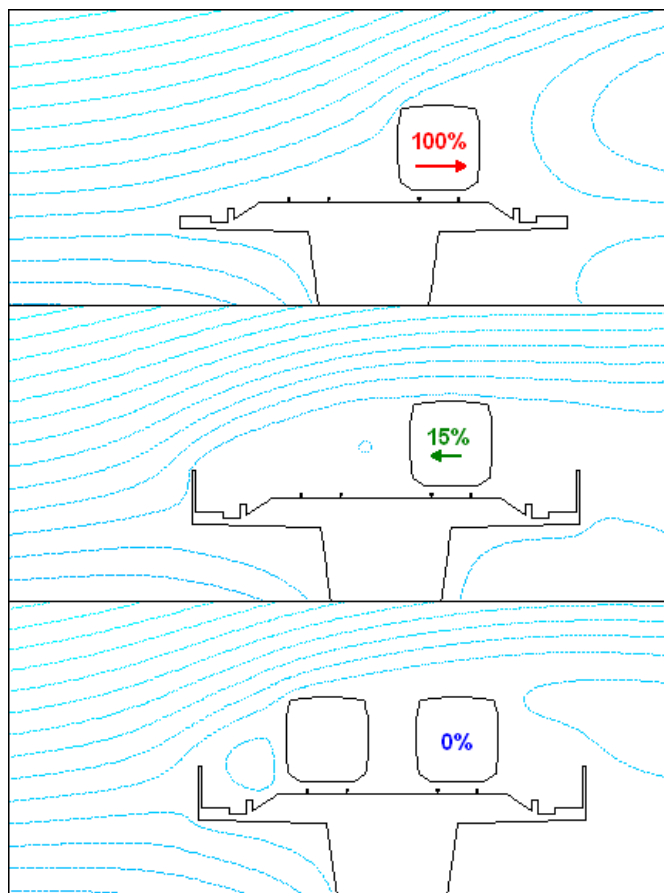


Imagen 6.9: Ejemplo del efecto de protección que provoca un tren situado en la vía de barlovento sobre el de la de sotavento.

Las imágenes permiten explicar de forma gráfica lo que sucede, en la primera imagen se ve como el viento incide directamente contra el perfil lo que provoca una determinada fuerza a la que se ha dado el valor del 100%. En la segunda la barrera desplaza el flujo por encima del tren, generando un remolino donde las velocidades son mas bajas, lo que provoca una depresión que fuerza a este levemente a contraviento. En la tercera imagen este remolino delante del tren estudiado desaparece al situarse otro tren como obstáculo entre él y la barrera, lo que provoca que quede completamente protegido del viento lateral, con afectación prácticamente nula.

A este respecto es interesante recoger que el tren 102 colocado a barlovento es el que mejores resultados da como elemento de protección, ya que su forma cuadrada levanta más la estela impidiendo que se forme un remolino amplio entre los trenes. Estos resultados pueden ser útiles a la hora del diseño de barreras que consigan que no se forme este remolino, que produce efectos levemente negativos, ya que no deja de ser una fuerza lateral sobre el tren.

Este efecto de levantar la estela implica también que el viento no pasa tan rápido por la parte alta de los trenes situados a sotavento, lo que como se refleja en los datos, produce otro efecto positivo; reduce la sustentación (representada por el coeficiente C_y) a valores lo suficientemente bajos como para afirmar que es despreciable..

Estos resultados dependen mucho del tipo de tren que se coloque en la vía de barlovento, lo que se puede tomar como una indicación de que la forma de la barrera será muy relevante a la hora de mejorar la afectación lateral sobre el tren y reducir los efectos de depresión que perjudican a la circulación por la vía de sotavento.

A modo de resumen se pueden sacar dos valoraciones, que aunque muy sintetizadas, son las conclusiones más importantes que se obtiene de este quinto análisis:

- El situar un tren en la vía de sotavento no afecta en nada o casi en nada al situado en la vía de barlovento.
- El situar un tren en la vía de barlovento siempre mejora las condiciones de afectación sobre el tren situado en la vía de sotavento.

6.1.7. CONCLUSIONES GENERALES DE LOS ENSAYOS PREVIOS.

A continuación, y a modo de resumen se va a realizar una recapitulación de las conclusiones más importantes obtenidas a lo largo de los ensayos previos realizados. Estos ensayos han planteado un proceso previo de evaluación del fenómeno con el objetivo de definir los parámetros geométricos más relevantes para el diseño aerodinámico de las barreras de protección frente a viento lateral.

El primer ensayo 0 ha permitido definir uno de los parámetros que quedaban por concretar en el planteamiento del problema que se ha hecho en anteriores capítulos, el emplazamiento más adecuado para las barreras situadas en terraplén.

Después del análisis efectuado, es el emplazamiento definido como 1, es decir, el más cercano a la vía, el que da mejores resultados. Y lo es fundamentalmente porque permite mitigar los efectos del viento lateral con menor

altura de valla, lo que a la larga supone un importante ahorro en cuanto a costes de material y de instalación.

Además en las valoraciones del ensayo ya expuestas, se recogen el resto de justificaciones que han provocado que sea este emplazamiento el que se emplee en adelante en todos los ensayos sobre terraplén.

Si bien es cierto que, como ya se advertía en el análisis y en las posteriores valoraciones, se observa ya en este ensayo que será necesario controlar que la altura de la barrera no sea excesiva, ya que si lo es provoca grandes depresiones entre el tren y la barrera que lo fuerzan a contraviento, sobre todo cuando circula por la vía de sotavento.

A partir de estos primeros resultados del ensayo 0, y sus primeras conclusiones, se plantea el siguiente ensayo 1, con el objetivo fundamental de concretar la influencia de los diferentes parámetros geométricos en la afectación dinámica del viento lateral sobre el tren.

Este ensayo 1 se ha dividido en tres comparaciones donde se contrasta la influencia del tipo de tren, el tipo de infraestructura, y la situación del tren en vía de barlovento o de sotavento.

Todas las valoraciones de las diferentes comparativas han sido recogidas en los anteriores apartados, y a modo de resumen se exponen a continuación las conclusiones más importantes de este ensayo:

- En ausencia de barreras o cuando estas son de baja altura, el tren 102 se ve mucho más afectado por el viento lateral que el 103, lo que implica que la instalación de barreras será más eficaz de cara a proteger al tren 102 que al 103, ya que las mejoras que se consiguen son mucho más apreciables.
- El diseño de trenes como el 103 resulta más eficaz para luchar contra los efectos del viento lateral, ya que su perfil más aerodinámico mejora sus prestaciones, haciéndolo menos vulnerable, siempre y cuando su peso permita hacer despreciables los efectos de la sustentación, que es mucho mayor que para el tren 102.
- En cuanto a la situación del tren, se ha comprobado que los trenes situados a sotavento se ven más beneficiados con la instalación de

barreras protectoras, ya que su C_x y C_y disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores. Esto implica que la situación en la vía de barlovento es la más restrictiva.

- Pero se ha comprobado que si se configuran barreras demasiado altas solo con el objetivo de proteger al tren de barlovento, se pueden generar depresiones que perjudiquen al tren que circula por la vía de sotavento.
- En ausencia de protección, los trenes que circulan sobre un viaducto sufren más los efectos del viento lateral, y por tanto se harán más necesarias las medidas correctoras.

Con el objetivo de afinar en un dato tan importante como la altura óptima de las barreras, dotar al proyecto de más exactitud, y de confirmar los resultados aproximados que se obtuvieron en los anteriores ensayos, se ha planteado el ensayo 2.

En este análisis se parte de los resultados anteriores para buscar los óptimos de barreras para el tren situado a barlovento, que como se vio en el ensayo 1 es la situación más restrictiva. Se ensaya todo el abanico de alturas desde los 0 hasta los 3m en intervalos de 0,5m, lo que permite sacar unas conclusiones más fiables:

- Se obtienen dos valores de altura óptima de barrera tipo A teniendo en cuenta la afectación horizontal, para el tren 103 la altura óptima es de 1,5m, y para el 102 estará alrededor de 1,75 m.
- Se confirma que las barreras son más necesarias en la configuración de vía sobre viaducto, aunque la altura óptima de barrera es la misma para el mismo tren situado a barlovento tanto en viaducto como en terraplén, por lo que las medidas correctoras que se propongan para viaducto pueden ser prácticamente igual de válidas para vía en terraplén, aunque menos efectivas.
- En cuanto al tren, el que se ve más afectado por los efectos de viento lateral es el tren 102, aunque habrán de tenerse muy en cuenta que el desarrollo de barreras eficaces para mejorar la circulación de éste tren frente a viento cruzado, no debe perjudicar a la circulación del otro tren, ya que ambos comparten la misma infraestructura.

Una vez que se han obtenidos los óptimos de altura de barrera, se plantea el ensayo 3. Partiendo del hecho de que, como se recogía en el último punto, ambos trenes comparten la misma infraestructura, se busca el estudio de dichos óptimos, para encontrar unos valores que en la medida de lo posible resulten una solución de compromiso para ambos. El análisis de los resultados y las valoraciones ya se han recogido en su correspondiente apartado, aquí se sintetizan solo las conclusiones más relevantes:

- Como ya se había planteado en el ensayo 1, se confirma que las condiciones de altura de barrera que son óptimas para un determinado tren situado en barlovento, no lo son para el mismo tren situado a sotavento ni para un tren diferente. Esto se debe a que barreras óptimas para un tren en vía de barlovento crean depresiones, que provocan que el tren en vía de sotavento se vea ligeramente forzado a contraviento.
- La vía de barlovento responde muy bien ante la colocación de barreras protectoras, pero en la vía de sotavento los resultados no son tan buenos. Por tanto en futuros ensayos hay que buscar distintos tipos de barreras que puedan mitigar este efecto sin hacer menos eficaz la barrera en la vía de barlovento.
- En lo que a dinámica vertical se refiere se sacan dos conclusiones fundamentales: La barrera de 1,75m es algo más eficaz desde este punto de vista, y que la efectividad de instalar barreras en viaducto es mayor comparada con la instalación de estas en terraplén. Además en todos los casos los valores de C_y mejoran con la instalación de barreras, sobre todo para los trenes situados a sotavento. La única excepción se produce para el tren 102 a sotavento, donde ni mejoran ni empeoran.

Como valoración principal de todo el ensayo 3 se concluyó que si el tren se sitúa sobre terraplén lo más adecuado es optar por barreras de tipo A de 1,5m, aunque la efectividad no es perfecta, y se podrán buscar otro tipo de medidas de mitigación que puedan dar mejores resultados.

En cuanto a la vía en viaducto parece que es más necesario seguir buscando medidas protectoras, ya que los resultados con las propuestas estudiadas hasta ahora, aún no son lo suficientemente satisfactorios, sobre todo

por el efecto vacío que provoca que el tren a sotavento se vea forzado a contraviento.

Por último se planteó en el ensayo 4 para ensayar escenarios con dos trenes simultáneamente, uno en la vía de barlovento y otro en la de sotavento, con la altura de barrera que como se ha visto ha dado hasta ahora los mejores resultados, de 1,5m.

Como se expuso en el análisis, estas conclusiones tienen en cuenta que este ensayo, al ser bidimensional, no considera muchas de las particularidades de un cruce de trenes, por lo que los resultados pueden no ser semejantes a los reales, ya que el modelo ensayado es estático. En base a estas consideraciones se pueden sacar algunas conclusiones:

- Respecto a la afectación por viento lateral, el hecho de que por una vía circulen a la vez dos trenes, no repercute en la estabilidad ni en la protección frente al viento lateral del tren situado en la vía de barlovento.
- En cambio sobre el tren situado en la vía de sotavento si se producen siempre mejoras en las condiciones de afectación.

Esta última afirmación dio lugar a un profundo análisis para estudiar las causas, que desemboca en una serie de conclusiones que pueden ser muy útiles a la hora de desarrollar barreras más eficaces que consigan que no se forme el remolino, que produce efectos negativos sobre el tren de la vía de sotavento.

- El tren de la vía de barlovento actúa como un obstáculo que rompe el remolino impidiendo que se forme la depresión que lo fuerza a contraviento.
- El tren 102 colocado a barlovento es el que mejores resultados da como elemento de protección, ya que su forma cuadrada levanta más la estela impidiendo que se forme un remolino amplio entre los trenes. Además al levantar la estela el viento no pasa tan rápido por la parte alta del tren situado a sotavento, reduciendo la sustentación a valores despreciables.

Una vez expuestas todas las conclusiones de los cinco ensayos que han configurado este estudio previo, ha quedado claro que el diseño de barreras tipo

A 100% eficaces para proteger todas las circulaciones de la línea de alta velocidad planteada es imposible.

Pero con estos ensayos previos se han recabado una gran cantidad de datos, se han acotado muchos de los valores influyentes, y se han descartado muchas de las soluciones anteriormente propuestas de manera que van a servir para poder plantear mejor los análisis de optimización.

6.2.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LOS ENSAYOS Y ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN DE LAS BARRERAS PARA-VIENTO.

A la luz de los resultados y conclusiones obtenidos en los ensayos previos de evaluación, se observa que existe la necesidad de profundizar en el análisis del diseño de barreras de protección para-viento que puedan solventar las carencias del modelo simple que ha sido estudiado hasta ahora.

Este modelo de barrera empleado en anteriores ensayos ya ha sido optimizado, sin embargo sus resultados aún no son todo lo buenos que cabría esperar, y por tanto se propone el plantear nuevos análisis con el objetivo de mejorarlos.

Por tanto, y resumiendo de forma esquemática lo que será este apartado, se van a plantear las características comunes que definen a todos los ensayos y análisis de optimización de las barreras.

6.2.1. OBJETIVOS GENERALES DE LOS ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN.

El principal objetivo de estos ensayos, es indagar sobre que tipos de barreras y soluciones aerodinámicas, son más eficaces a la hora de proteger al tren de los efectos negativos producidos por el viento lateral.

Básicamente se parte de las conclusiones extraídas y carencias observadas en los análisis de los ensayos previos. Como se vio, la barrera básica denominada tipo A, no es capaz de dar unos resultados óptimos, y por tanto se van a buscar nuevos diseños para intentar conseguir unas soluciones mejores.

Las principales carencias que se observan en los anteriores ensayos previos, y sobre las que se basa el planteamiento de estos ensayos de optimización, son:

- Se deben buscar modelos de barreras que por sus características morfológicas logren mitigar el efecto de vacío que fuerza al tren en sentido contrario al viento, sobre todo cuando este se sitúa en la vía de sotavento. Se ha visto que este efecto puede llegar a ser muy importante, y el mitigarlo será uno de los grandes objetivos de los análisis en detalle.
- Los resultados del ensayo 4 pueden dar una idea de que formas son más eficaces para reducir este efecto, porque ya se vio que en función de la forma del tren en barlovento se mejoraban o no los resultados en el de sotavento.
- Será interesante desarrollar y estudiar formas de barrera que puedan hacer mejorar la sustentación sin perjudicar los valores de coeficiente lateral que son los realmente importantes. En relación con esto sería conveniente fijar los beneficios reales que pueden tener estas medidas en relación con la sustentación.
- Se ha demostrado que el tren 103 responde mejor frente al viento lateral en ausencia de barreras. Esta idea es muy importante si se quiere focalizar el estudio en la instalación de barreras para la protección de un solo tren, o para futuros desarrollos que adaptarán la forma de los trenes tomando como modelo el tren 103.

6.2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN.

Los ensayos de optimización se van a dividir en ensayos enfocados a la configuración de vía sobre viaducto, y sobre terraplén. Al igual que antes estos apartados se van a dividir en diferentes ensayos, que progresivamente vayan optimizando la forma de la barrera. En cada uno de estos ensayos el modo de trabajar va a ser de prueba-error, se prueba una solución, si da mejores resultados se sigue por esa línea, si no se desecha y se prueba otra.

Generalmente las pruebas se van a iniciar en aquellas condiciones que resultaron más desfavorables, y que por tanto en las que la barrera Tipo A resultaba menos eficaz. Por esta razón se va a empezar probando en la configuración de vía sobre viaducto, que es la situación que peores resultados ha dado. Una vez optimizado un diseño para estas condiciones, el siguiente apartado hará lo mismo para la configuración de terraplén.

Todos los ensayos van a tener aproximadamente el mismo desarrollo, y por tanto, se puede definir una geometría y condiciones de operación comunes para todas las pruebas de optimización de barreras para-viento que se van a realizar.

Existirán pequeñas diferencias como consecuencia de que los parámetros relativos a las barreras que se evalúan no son todos iguales. Por esta razón las mallas no pueden ser exactamente semejantes en todos los modelos, pero si la forma de construirla, lo que hace que las variaciones entre mallados sea realmente muy leve.

A continuación se van a especificar uno por uno los parámetros generales que definen estos ensayos de optimización de la forma de la barrera para-viento, geometrías, mallados, condiciones de contorno, condiciones de operación, así como los parámetros que se evaluarán en estos ensayos.

6.2.2.1. GEOMETRÍA DE LOS MODELOS.

La geometría de los modelos y su marco general ya fue especificada en el anterior capítulo 5, ya que son generales para todos los ensayos que conforman este trabajo, y por tanto también para estos de optimización que se están planteando.

Solo queda especificar lo referente a las barreras para-viento. Se probarán diferentes soluciones que se espera puedan optimizar el flujo de aire incidente sobre el tren. Estas soluciones propuestas son fruto de una intensa investigación y documentación previa. Se van a plantear a grandes rasgos dos tipos de soluciones:

- Barreras con deflectores en su parte superior. Es posible que la instalación de deflectores o alerones pueda levantar el flujo por encima del tren de barlovento, y cuando está a la altura del sotavento hacer que baje la estela lo suficiente como para normalizarlo y no crear la depresión que como vio fuerza al tren que circula por esta vía a contraviento.
- Probar con barreras con un hueco en su parte inferior. Es posible que este tipo de solución mejore algo la sustentación, de manera que su influencia ayude a optimizar la estabilidad del tren a la vez que se ahorra en material de fabricación de las barreras.

Ambas son soluciones que normalmente se han planteado en trabajos similares a este, o que se emplean en otros campos con inquietudes semejantes a las que aborda este proyecto, aerodinámica vehicular, arquitectura o agricultura por ejemplo.

También se podrán ensayar medidas que combinen estas ideas, por ejemplo, barreras con deflectores y un hueco inferior. La siguiente figura recuerda los tipos de barreras que se van a emplear, entre ellas está la tipo A que fue la estudiada en los ensayos previos y que se empleará para comparar resultados.

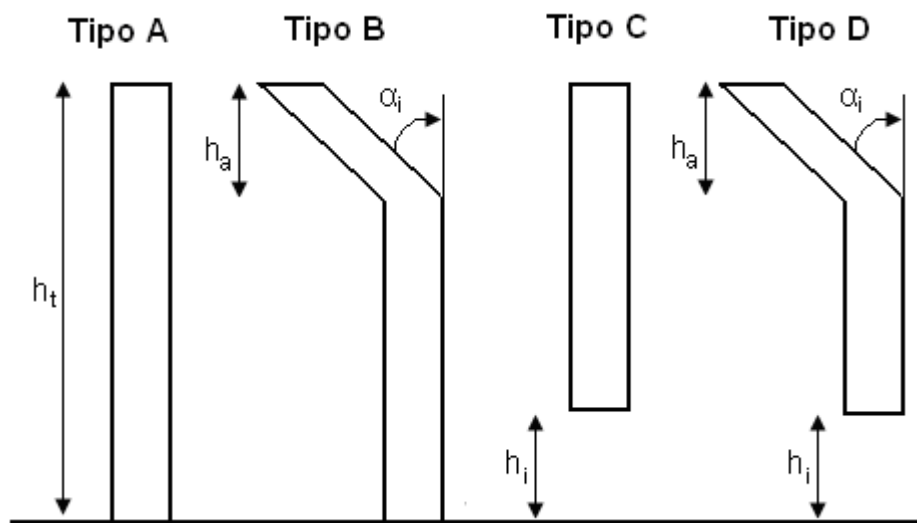


Imagen 6.10: Barreras para-viento que se emplearán en los ensayos de optimización.

En la figura también se recogen los diferentes parámetros que definen a cada una de estas barreras tipo, pero será en cada ensayo en particular donde se acotarán los valores que tomarán estos parámetros en función de los resultados que se vayan obteniendo.

6.2.2.2. CONDICIONES DE MALLADO.

Para estos ensayos se ha optado por emplear de inicio un mallado más complejo y eficaz, dado que se pretende obtener resultados más exactos. Es un modelo de mallado más estable y que combina celdas rectangulares, con celdas triangulares.

Las celdas rectangulares dan mejores resultados a la hora de realizar simulaciones con el programa FLUENT, ya que permiten una mejor integración y resultan más sencillas de calcular para el programa. Pero en nuestro caso, y dado

la geometría tan compleja que tenemos es obligado el empleo de mallas a base de triángulos en la gran mayoría del dominio computacional, y solo se emplearán mallas cuadradas en aquellas zonas que requieran mayor precisión y que lo permitan.

En base a estas condiciones se han desarrollado los mallados de los diferentes ensayos. Obviamente al igual que sucedía en los ensayos previos, no todos pueden ser análogos, dado que hay parámetros como el tipo de tren, la infraestructura (viaducto o terraplén) o la misma forma de la barrera que hace que varíe levemente la forma de este.

El mallado se ha vuelto a construir a partir de nodos en las líneas que definen las superficies, de manera que cada nodo constituye un vértice raíz de una celda. Partiendo de estos vértices el programa GAMBIT dibuja el mallado.

El mallado que se va a plantear para estos ensayos en detalle es prácticamente análogo al planteado para los ensayos previos, a excepción hecha de una particularidad que lo hace más preciso a la hora del cálculo.

La particularidad es que se van a emplear mallas rectangulares, que como se ha indicado dan mejores resultados y precisión en las iteraciones. Estas mallas se dispondrán alrededor del tren, zona en la que se busca obtener más precisión.

Esta malla rectangular está formada por cinco filas de rectángulos, de iguales dimensiones en cuanto al largo y ancho creciente hacia fuera de la superficie. La siguiente imagen muestra un detalle de como es este mallado:

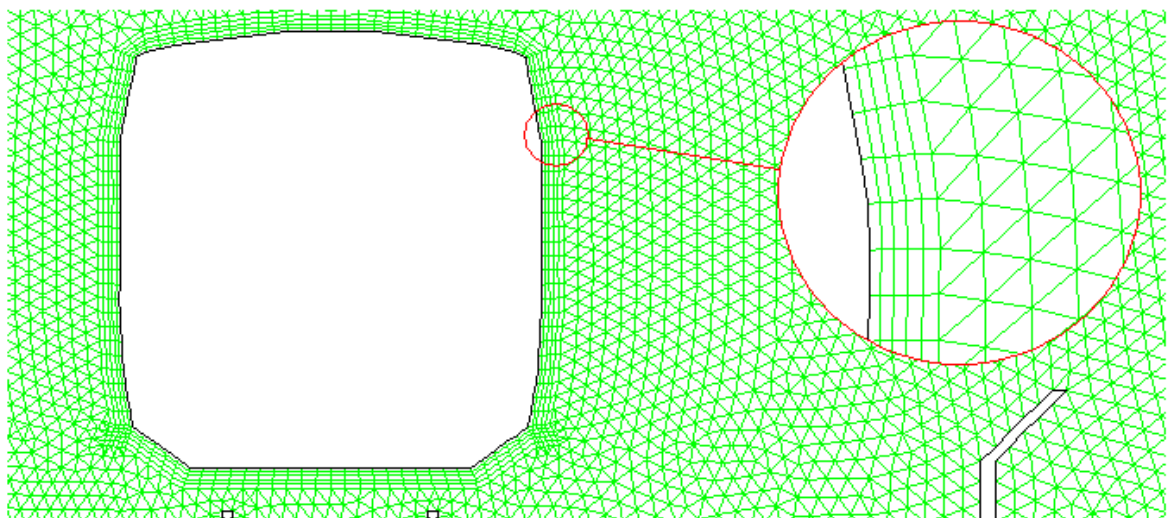


Imagen 6.11: Detalle del mallado rectangular alrededor del contorno del tren

El resto del mallado del dominio computacional es, como se ha dicho análogo al ya planteado en los ensayos previos, y por tanto se remite al lector al correspondiente apartado para su consulta.

En estos ensayos que buscan una mayor precisión y unos resultados más cualitativos que cuantitativos se van a realizar unos procesos de adaptación del mallado. El programa FLUENT permite después de una simulación, seleccionar las celdas que tienen los mayores gradientes de diferencia respecto a las que las rodean, para a partir de esta selección afinar la malla en estas celdas.

Esta herramienta del programa permite adaptar el mallado refinándolo de forma regular en aquellas zonas en las que el flujo necesita de un mayor detalle para su correcta simulación.

Las adaptaciones se pueden realizar en base a cualquiera de las variables monitorizadas, en este caso, se van a realizar en base a los gradientes de presión, es decir en aquellas zonas donde estos gradientes sean más bruscos que la media se refinará el mallado tantas veces como sea necesario para obtener la mayor precisión posible.

Lo más común es que se produzcan en las zonas más críticas, superficies inferior y superior del tren, pico del viaducto o de la barrera, donde se levanta la estela, o en el suelo. Las mallas triangulares se dividen en tres nuevos triángulos, y las rectangulares en tantas partes como fuera necesario, con lo que la malla original no sufre deformaciones que puedan afectar a su regularidad geométrica.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de zona que precisa de un refinado del mallado para mejorar la integración numérica que da lugar a los resultados que se estudiarán.

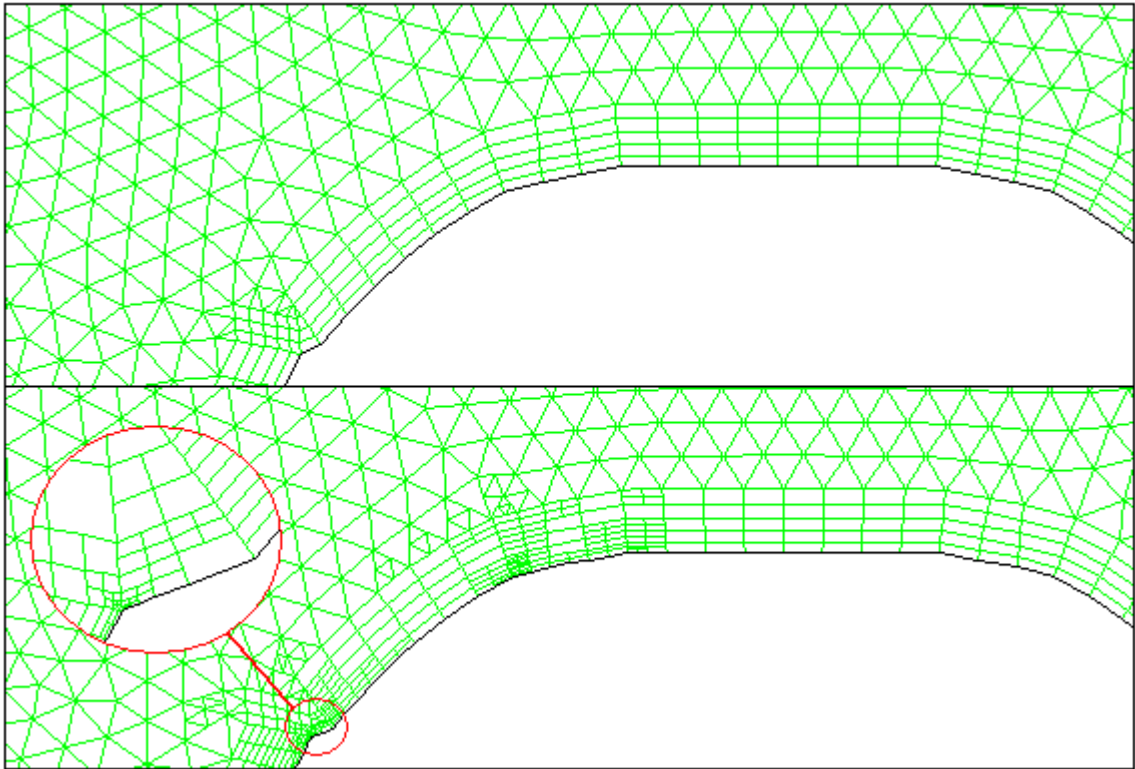


Imagen 6.12 Detalle de dos mallados. En la figura superior el mallado original con el que se empieza la simulación, y en la inferior el mallado adaptado según los gradientes de presión.

En la imagen se representa una de las situaciones antes mencionadas donde el mallado necesita cierta afinación, en este caso se ha representado la parte superior del tren 103. En la figura superior se representa el mallado original que se simula en primer lugar, y en la figura inferior el mallado simulado en el último ensayo de uno de los modelos, es decir, después de pasar por una determinado número de adaptaciones en función de los gradientes de presión calculados en el mismo numero de simulaciones.

Como se aprecia, el programa ha dividido aquellas celdas que ha considerado oportunas para dotar de mayor precisión al análisis. En la imagen inferior se muestran divisiones de celdas triangulares y rectangulares, e incluso un pequeño detalle de la esquina superior derecha, para poder apreciar mejor esta adaptación por gradientes del mallado.

Se puede afirmar por tanto que no todos los mallados son iguales, pero si equivalentes. El número de celdas varía obviamente en función de la altura y forma de la barrera y del tipo de tren de cada simulación, así como de las particularidades fluido-dinámicas de cada una de ellas que luego definen las celdas que deben ser refinadas.

El número de celdas después de refinar con FLUENT, aumenta entre 5.000 y 10.000 unidades dependiendo de la complejidad de la iteración y del modelo. En total los mallados de estos ensayos en detalle contienen entre 85.000 y 110.000 celdas para los ensayos en viaducto, y entre 75.000 y 95.000 para los ensayos en terraplén, triangulares y cuadradas, unas 10.000 más que en los modelos de los ensayos previos.

6.2.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO.

Las condiciones de contorno también son las definidas y explicadas en el capítulo cinco. Aquí solo se presentaran los valores característicos y parámetros que especifican estos ensayos en concreto.

Se volverá a emplear una velocidad del aire a la entrada de 20m/s en dirección horizontal al suelo, aunque como se ha explicado ya, el valor de velocidad no es relevante ya que lo que se busca es comparar diferentes alternativas de barrera para-viento mediante variables adimensionales.

Se toma este valor en función de los estudios realizados en el planteamiento del problema, que lo consideran un valor medio aconsejable para obtener resultados lo más generales posibles.

Al igual que para los ensayos previos, los valores de energía cinética turbulenta y de relación de disipación turbulenta que definen la turbulencia del flujo de entrada son los que el programa FLUENT define por defecto, que son los que recomiendan en el manual para las condiciones en que se van a desarrollar estos ensayos.

Las rugosidades y otras condiciones de contorno que no han sido especificadas aquí como presión atmosférica o temperatura, están definidas en el capítulo 5 en sus correspondientes subapartados, y su recopilación en éste resultaría de nuevo reiterativa.

6.2.2.4. CONDICIONES DE OPERACIÓN.

El modelo de resolución de las ecuaciones que se va a emplear en todos los ensayos de optimización es el Standard k-epsilon que ya se definió en el apartado 3.1.2.3 y se empleó en los ensayos previos. Es un modelo de 2 ecuaciones muy usado en la industria, robusto, económico en cuanto a recursos informáticos, y razonablemente exacto.

En estos ensayos en detalle se busca una mayor precisión en los resultados. Por ello se va a iniciar el programa de CFD en doble precisión. De esta forma FLUENT proporciona unos resultados más fiables, ya que optimiza la precisión de cada una de las iteraciones. Ahora bien, el emplear la doble precisión también implica que el tiempo de cada iteración es el doble o incluso superior.

Además para realizar el refinamiento del mallado antes comentado, es necesario que los cálculos se repitan al menos cinco veces, para así dar lugar a que el programa localice las celdas que dan peores gradientes, y las adapte de forma que se simule mejor el flujo de aire y se llegue a una correcta convergencia en los resultados.

Estas dos consideraciones harán que sea necesario definir con más cautela los modelos a ensayar, ya que llevaría mucho tiempo ensayar todos los modelos posibles. Es decir, será necesario sacrificar algo de diversidad en los modelos a cambio de una mayor precisión en los resultados.

6.2.2.5. PARÁMETROS A EVALUAR.

El objetivo ahora es ir delimitando el estudio para progresivamente ir optimizando la forma de la barrera con el menor número de ensayos posibles. Para ello se evaluarán parámetros que permitan comparar rápidamente si una nueva suposición mejora o empeora a la anterior.

De nuevo el empleo de parámetros adimensionales es lo más adecuado, ya que permiten evaluar la bonanza de las soluciones independientemente de las condiciones de contorno.

Estos parámetros son los coeficientes adimensionales (ya definidos en la ecuación 3.2.2.5), tanto de fuerza lateral como de sustentación. Estos coeficientes dan una idea adimensional de las fuerzas laterales y de sustentación que actúan sobre el tren, y son los mismos que ya se emplearon en los modelos de los ensayos previos, C_x y C_y .

Para C_x hay que considerar que valores de este coeficiente cercanos a cero implicaría que el tren no se ve afectado por el viento lateral. De igual forma cuanto mayor sea este coeficiente mayor afectación, y si es negativo es porque se crea una depresión que fuerza al tren al sentido contrario al viento.

También se tendrá en cuenta la sustentación a partir del coeficiente C_y , considerando que valores muy altos implican que el viento levanta al tren, haciendo que su “peso” sea menor. Valores negativos de C_y tienen el efecto contrario, es decir ayudan a que el tren se pegue más a la vía.

Los resultados van a ser comparados con condiciones simuladas anteriormente, pero hay que tener en cuenta que las condiciones de mallado y de contorno han variado, aunque sea mínimamente. Por ello se hace necesario repetir algunos de los ensayos realizados para tener una base de comparación.

Esto no quiere decir que los resultados de los ensayos anteriores sean incorrectos, sino que eran menos precisos y por tanto no se pueden comparar con los que se van a realizar en adelante. Aquellos ensayos previos son perfectamente válidos en tanto en cuanto constituyen un análisis que buscaba comparar diferentes soluciones y cubrir un vacío de información existente.

Obviamente para comparar resultados de estos nuevos ensayos hay que plantear unos patrones que hayan sido desarrollados en base a los mismos parámetros, para que la comparación sea exacta.

En muchos casos se va a realizar un análisis estadístico, donde se refleje el tanto por ciento de mejora respecto a las citadas condiciones sin barrera, para de esta forma conocer cuanto mejora la afectación lateral con cada tipo de barrera. Se realizará en base a un parámetro al que se denominará en adelante eficacia de la barrera. La ecuación que define esta variable que ya se uso anteriormente es.

$$\text{Eficacia(\%)} = \frac{C_0 - |C_h|}{C_0} \times 100 \quad (6.2.2.1)$$

Donde C_0 es el valor de C_x o C_y cuando la altura de barrera es cero y C_h es el valor de C_x o C_y que se quiere comparar, es decir, con una altura de barrera h dada.

Para hacer este análisis más exacto hay que tener en cuenta también la fuerza a contraviento sobre el tren que en ocasiones aparece con algunas barreras por el efecto de vacío que se genera tras de ellas. Cuanto mayor es esta fuerza menos efectiva es la barrera. Por eso aparece el valor absoluto en el valor del coeficiente C_h .

6.3. OPTIMIZACIÓN DE LA BARRERA DE PROTECCIÓN LATERAL EN LA CONFIGURACIÓN DE VÍA SOBRE VIADUCTO.

Primero se va a centrar el estudio en la configuración de vía sobre viaducto que es la que peores resultados ha dado hasta ahora. Como ya se ha demostrado esta configuración es la más restrictiva.

Por esto primero se plantea el estudio de optimización de la configuración de vía sobre viaducto, y así luego a partir de estos resultados más restrictivos y exigentes con los cálculos, será más sencillo plantear la protección frente al viento lateral de las vías sobre terraplén.

Para este análisis de vías sobre viaducto se van a proponer diferentes ensayos, donde se van a probar con las soluciones aerodinámicas ya comentadas para las barreras, deflectores y huecos inferiores.

Este estudio de optimización se dividirá en dos ensayos, el primero para optimizar la altura de la barrera y obtener resultados que sirvan como patrones a la hora de comparar resultados (ensayo 5) y un segundo donde más específicamente se buscará la forma de barrera que mejor cubra las necesidades y objetivos planteados (ensayo 6).

Estos dos ensayos y sus respectivos análisis buscarán conseguir una protección lo más eficaz posible de los trenes que circulan por la configuración de vía en viaducto, buscando mitigar los efectos negativos del viento lateral.

6.3.1.- ENSAYO 5: OPTIMIZACIÓN DE LA ALTURA DE LA BARRERA PARA LA CONFIGURACIÓN DE VÍA EN VIADUCTO.

Como se ha descrito anteriormente estos ensayos de optimización tiene un nuevo planteamiento en cuanto a mallados y en cuanto al modelo de resolución.

Esto introduce cambios en las simulaciones, que obliga a repetir algunos de los ensayos anteriores en estas nuevas condiciones para poder comparar con los nuevos resultados que se obtendrán en los siguientes ensayos.

6.3.1.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 5.

Con este ensayo se van a obtener resultados más precisos en modelos que ya fueron simulados anteriormente, con dos motivaciones principalmente:

Primero para tener con que comparar los nuevos resultados que se obtengan en adelante, ya que es obvio que es necesario hacerlo con modelos que hayan sido simulados en iguales condiciones, y por tanto los resultados de los ensayos previos no se pueden comparar con estos nuevos resultados.

Segundo porque se va a plantear un análisis que confirme los indicios que mostraban los anteriores ensayos sobre la altura de barrera óptima, ya que este es un parámetro muy relevante y de gran interés, y por tanto merece la pena realizar un estudio en detalle de este aspecto.

6.3.1.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 5.

A partir de los resultados y conclusiones de los ensayos previos, se dedujo que la altura óptima de barrera se encontraba entre 1,5 y 2 metros.

En base a estos resultados se va a plantear este ensayo, y con esta acotación de alturas, se van a simular modelos con tres alturas de barrera: 1'5, 1'75, y 2 metros. Además se simularán también los modelos sin barrera para que sirvan como patrón a la hora de evaluar las mejoras obtenidas.

Como los resultados se emplearán para comparar se ha considerado necesario simular todas las condiciones posibles, es decir, los dos tipos de tren situados en la vía de barlovento y en la de sotavento. Así se obtendrán resultados más precisos con las nuevas condiciones de simulación definidas.

La siguiente tabla recoge las 16 simulaciones que se van a realizar en este ensayo, así como la nomenclatura empleada para referirse a ellas.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren	Barlovento/Sotavento	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.
Simulaciones con vía en Viaducto	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	0	V2B_0
			1,5	V2B_1,5A0
			1,75	V2B_1,75A0
			2	V2B_2A0
		Tren a sotavento	0	V2S_0
			1,5	V2S_1,5A0
			1,75	V2S_1,75A0
			2	V2S_2A0
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	0	V3B_0
			1,5	V3B_1,5A0
			1,75	V3B_1,75A0
			2	V3B_2A0
		Tren a sotavento	0	V3S_0
			1,5	V3S_1,5A0
			1,75	V3S_1,75A0
			2	V3S_2A0

Tabla 6.20: Simulaciones que conforman el ensayo 5 y su nomenclatura en la última columna.

6.3.1.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 5.

Todos los resultados aquí representados y analizados se encuentran en el anexo D, aquí se exponen estos mismos pero de forma que sean más útiles para sustentar las explicaciones que se desarrollen.

La siguiente tabla muestra los coeficientes aerodinámicos clasificados por tipo de tren y vía, los resultados del tren 102 arriba y los del 103 abajo, los de la vía de barlovento a la izquierda y los de sotavento a la derecha.

V2B			V2S		
Altura	Cx	Cy	Altura	Cx	Cy
0	1,81280562	0,40405479	0	1,43461091	0,31719655
1,5	0,26011112	0,59402511	1,5	-0,27907021	0,10995637
1,75	0,00683009	0,66758329	1,75	-0,50961503	-0,06929321
2	-0,22661758	0,43683641	2	-0,67837534	-0,27577148
V3B			V3S		
Altura	Cx	Cy	Altura	Cx	Cy
0	0,94545619	1,05774744	0	0,88973259	0,90847931
1,5	0,59610096	0,8330126	1,5	0,12542759	0,34091833
1,75	0,24954598	0,72804173	1,75	-0,16301787	0,28777453
2	-0,10944484	0,49327487	2	-0,34045532	0,13020839

Tabla 6.21: Valores de los coeficientes aerodinámicos del ensayo 5.

En este análisis no se va a entrar en comparaciones profundas entre diferentes tipos de trenes ni de emplazamiento, porque ya se realizaron en los ensayos previos. Lo que si se puede decir a la vista de los resultados es que se mantienen una concordancia con los resultados anteriores en cuanto a comparar diferentes situaciones.

En la anterior tabla se puede observar como el tren 102 se ve mucho más afectado en ausencia de barrera, pero como también, la colocación de esta reduce mucho más su afectación lateral, hasta hacerla prácticamente cero para barreras de 1,5-1,75m de altura.

Los coeficientes C_x , que son los realmente interesantes, descienden bruscamente al aumentar la altura de la barrera, cuando del tren 102 se trata. No así cuando se analiza el tren 103, donde la efectividad de las barreras es algo menor. La siguiente gráfica muestra esto que se comenta:

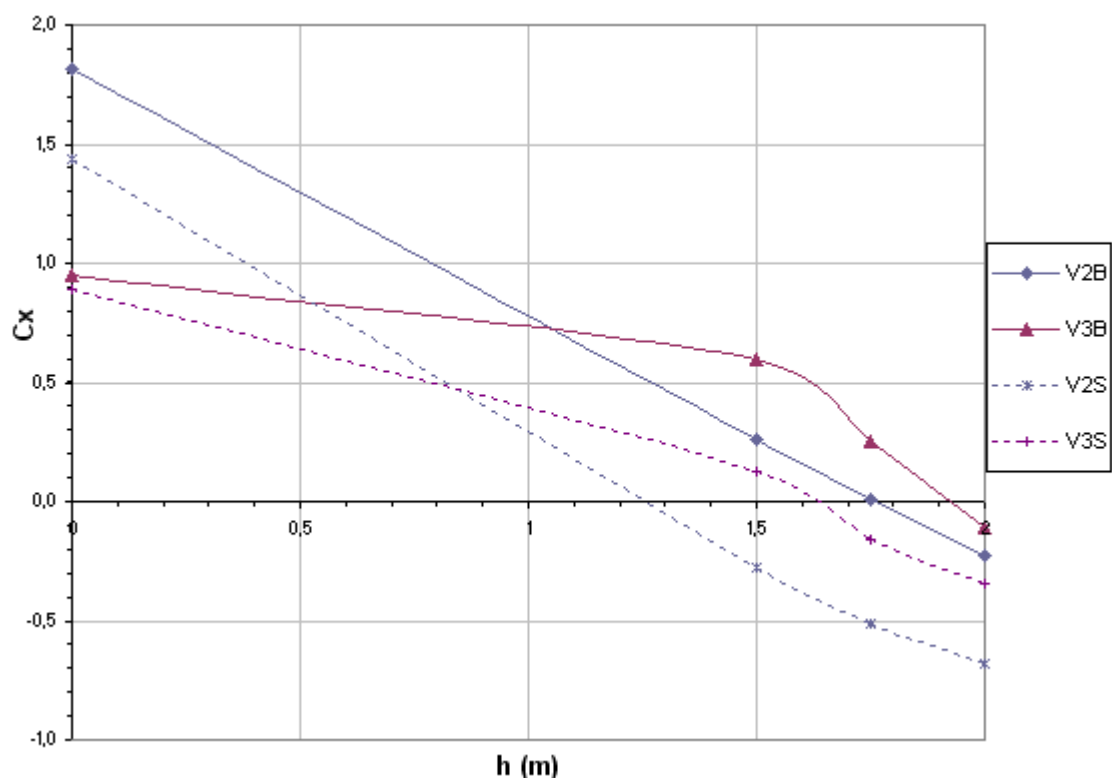


Gráfico 6.13: Variación de C_x en función de la altura de la barrera. Gráfico a partir de los resultados del ensayo 5. En azul grisáceo los resultados del tren 102 y en ciruela los del 103. Con línea de trazo continuo los resultados de los trenes en vía de barlovento y con discontinuo los de vía de sotavento.

También se observa que las líneas de un mismo tren guardan un cierto paralelismo, lo que implica que cuanto más eficaz es la barrera para el tren de

barlovento, más se fuerza al tren de sotavento a contraviento, reduciendo por tanto la efectividad de dicha barrera para un ferrocarril que circulara por esta vía.

Por tanto es complejo realizar el análisis de que altura de barrera es la más eficaz, por ejemplo si solo tuviera en cuenta al tren 103 a barlovento, sería de algo más de 1,75m, pero si se tiene en cuenta solo al tren 102 a sotavento sería de menos de 1,5m.

Por eso se va a realizar un análisis estadístico con la variable definida en la ecuación 6.2.2.1 para el coeficiente C_x . Este parámetro definido anteriormente permite conocer en tanto por ciento cuanto mejora la afectación lateral con cada altura de barrera.

Las siguientes tablas muestran estos resultados de la eficacia obtenidos a partir de los valores del ensayo (Tabla D.1).

Eficacia en % de la barrera de 1,5m evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	85,6514611	36,9509697	61,3012154
Sotavento	80,5473241	85,9027764	83,2250502
Media	83,0993925	61,4268731	72,2631328
Eficacia en % de la barrera de 1,75m evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	99,6232308	73,6057592	86,614495
Sotavento	64,4771257	81,6778803	73,077503
Media	82,0501783	77,6418198	79,845999
Eficacia en % de la barrera de 2m evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	87,4990691	88,4241233	87,9615962
Sotavento	52,7136359	61,7350963	57,2243661
Media	70,1063525	75,0796098	72,5929811

Tabla 6.22: Eficacia en tanto por ciento de barreras de 1,5, 1,75 y 2m de altura evaluadas en C_x .

Este análisis así planteado que se muestra en la tabla superior, permite al lector sacar tantas conclusiones como quiera, se puede comparar que tanto por ciento de eficacia supone cualquiera de las tres barreras para un tipo de tren, para una situación en la vía o en términos generales.

La más importante de estas posibles conclusiones es que salta a la vista que la barrera de 1,75m es en términos globales la más eficaz.

Si se divide el estudio por trenes para el 103 es claramente la mejor barrera posible, mientras que para el 102 está cerca pero no lo es, una barrera de 1,5m representa una solución de mayor compromiso entre las fuerzas sobre el tren situado en la vía de barlovento y las del tren situado en la vía de sotavento.

Centrándose en una visión global de la infraestructura y el material rodante estudiado, no cabe duda de que, considerando solo la afectación lateral, la barrera del tipo A que mejores resultados da es la de 1,75m de altura.

Esto en lo que se refiere al análisis de la afectación lateral evaluada a través del coeficiente C_x . Se analizará ahora el coeficiente C_y en busca de aspectos relevantes, aunque como se ha explicado más de una vez, carece de la importancia del coeficiente C_x .

La siguiente gráfica muestra la evolución de dicho coeficiente en función de la altura de la barrera para los cuatro casos estudiados.

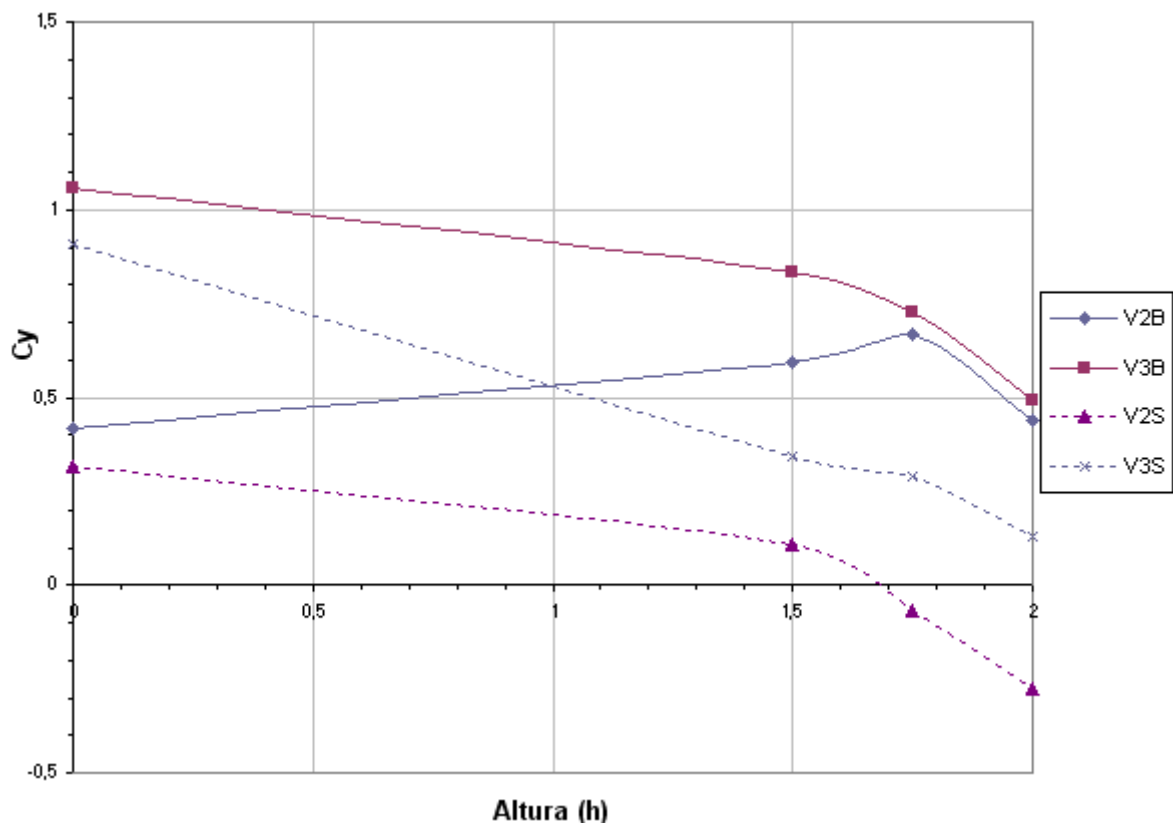


Gráfico 6.14: Variación de C_y en función de la altura de la barrera. Gráfico a partir de los resultados del ensayo 5. En azul grisáceo los resultados del tren 102 y en ciruela los del 103. Con línea de trazo continuo se presentan los resultados de los trenes en vía de barlovento y con discontinuo los de vía de sotavento.

Lo que más llama la atención es que mientras que en los casos de trenes situados en la vía de barlovento la afectación disminuye poco o incluso aumenta algo (como para el caso del tren 102 con barrera de 1,75m), en los trenes de sotavento conforme aumenta la altura de la barrera disminuye la afectación vertical.

Este dato viene a justificar aún más la elección de una barrera de mayor altura aunque produzca efectos de fuerza a contraviento en el tren de sotavento, ya que cuanto mayor altura se reduce la sustentación que, aunque en menor grado, beneficia la estabilidad del tren.

El único caso para el que no se cumple esta afirmación es para el ya citado del tren 102 a barlovento. Esto se debe a que por su forma poco aerodinámica no consigue levantar la estela por encima del tren hasta que la barrera supera los 2m de altura.

Si se realiza el mismo análisis estadístico anterior, pero ahora en base a los resultados del coeficiente C_y , se obtiene la siguiente tabla:

Eficacia en % de la barrera de 1,5m evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-47,0160	21,247	-12,885
Sotavento	65,335	62,474	63,904
Media	9,159	41,860	25,509
Eficacia en % de la barrera de 1,75m evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-65,221	31,171	-17,0259
Sotavento	78,154	68,323	73,239
Media	6,467	49,747	28,107
Eficacia en % de la barrera de 2m evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-8,113	53,366	22,6269
Sotavento	13,060	85,667	49,364
Media	2,473	69,516	35,995

Tabla 6.23: Eficacia en tanto por ciento de barreras de 1,5, 1,75 y 2m de altura evaluadas en C_y .

Como cabía esperar, a medida que aumenta la altura de la barrera, esta se hace más eficaz en términos de reducción de la sustentación. Este aumento se hace patente en los dos tipos de tren y de infraestructura, a excepción hecha del caso ya comentado del tren 102 en vía de barlovento.

Por lo tanto se concluye que el aumento en la altura de la barrera casi siempre beneficia la sustentación del tren y que en los términos globales en los que se está realizando este análisis se puede decir que mejora la situación de partida hacia unos resultados más estables.

6.3.1.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 5.

Teniendo en cuenta tantos los resultados de C_x como los de C_y , se puede concluir a partir del análisis anterior, que para el caso de infraestructura de viaducto, la barrera más eficaz de las denominadas en este proyecto como tipo A, es la de 1,75m de altura.

Con esta barrera simple, es sobre esta altura donde se obtienen los mejores resultados en cuanto a afectación lateral, y los resultados en cuanto a la vertical son lo suficientemente aceptables como para considerar esta solución como la más ventajosa de entre las estudiadas hasta ahora.

Desde el punto de vista de los resultados numéricos, de nuevo se vuelve a poner de relieve la necesidad de llegar a un compromiso entre las fuerzas en la dirección del viento que afectan al tren de barlovento y las fuerzas que, a causa de la depresión que se forma tras la barrera, fuerzan al tren de sotavento a contraviento.

Esto supone una limitación muy importante, ya que barreras de mayor altura consiguen proteger de forma más eficaz al tren de barlovento, pero no se puede emplear una altura de barrera óptima para esta vía sin considerar los efectos de vacío que crea en la vía vecina.

El desarrollo de los siguientes modelos de barreras de protección lateral deberá ir encaminado a conseguir soluciones que sean capaces de mitigar los efectos de depresión que afectan negativamente al tren situado en la vía de sotavento.

Con barreras que consigan mejorar estos efectos se conseguirían mejores resultados a nivel global, ya que es el tren situado en la vía de sotavento el que disminuye la efectividad de las barreras, y por tanto mejorar la afectación sobre este tren permitiría obtener barreras más eficaces.

6.3.2.- ENSAYO 6: OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA DE LA BARRERA AÑADIÉNDOLE DEFLECTORES INCLINADOS Y HUECOS INFERIORES.

El ensayo 6 es el primero de estos ensayos de detalle que realmente busca una optimización de la forma de la barrera usando nuevas soluciones hasta ahora no estudiadas.

Concretamente se busca estudiar si el empleo de barreras con deflectores, a modo de alerones en la parte superior de la barrera, y con huecos, en la parte inferior, puede mejorar el diseño de esta, y de ser así evaluar en que medida.

6.3.2.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 6.

El primer punto de partida de este nuevo ensayo son las conclusiones del anterior. Como se vio es necesario seguir investigando en el desarrollo de barreras que suplan los defectos de las estudiadas hasta ahora.

Se va a tratar de dar con una forma de barrera algo más eficaz, y para ello se parte también de la literatura publicada, tanto sobre temas íntimamente ligados con la afectación por viento lateral en trenes de alta velocidad, como en otros campos de la ingeniería y la arquitectura donde también se presentan problemas asociados a fuertes vientos.

Para ser más concretos, lo que se va a plantear es simular la protección del tren con barreras de formas algo más complejas que las simuladas hasta ahora. Se van a estudiar tres posibles soluciones;

- Barreras que tienen un deflector en su parte superior, a modo de alero, para intentar modificar la estela de viento que sobrepasa la barrera afectando al tren.
- Barreras con un hueco inferior que mejoren la sustentación, y fundamentalmente que disminuyan el efecto de vacío que se genera tras la barrera.
- Una combinación de ambas soluciones en el caso de que se creyese que pueden dar resultados favorables.

En cuanto a los deflectores se intuye que pueden lograr que la estela se adapte de mejor manera a las necesidades de protección del material rodante ya planteadas. Obviamente el colocar deflectores inclinados da lugar a dos posibles

soluciones, dependiendo de que la inclinación se haga hacia dentro o hacia fuera. La siguiente figura muestra estas dos posibles opciones.

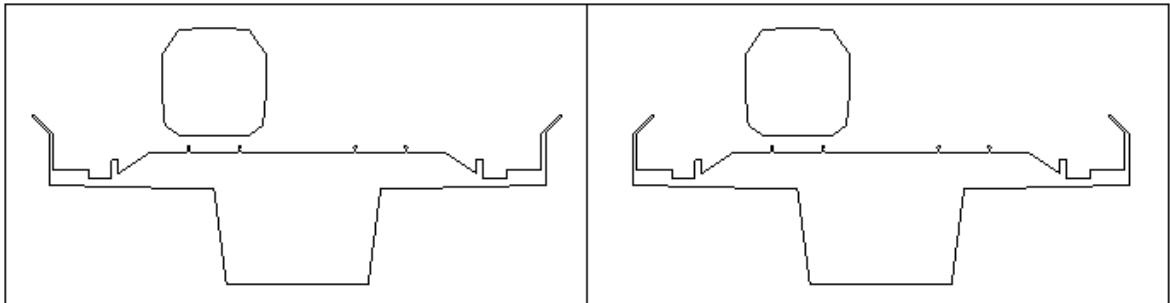


Imagen 6.13. Barreras para-viento con deflectores inclinados hacia dentro y hacia fuera.

Por tanto hay dos ideas a afrontar dentro del estudio de barreras con deflectores, y se plantean en base a lo que se cree que pueden aportar cada una de ellas:

- La imagen de la derecha muestra una opción que puede levantar el flujo por encima del tren de barlovento con menor altura de barrera, y hacer que baje más drásticamente haciendo que en la vía de sotavento la estela no cree una gran depresión.
- Mientras que la otra opción de la derecha puede ser también interesante, ya que la forma del alero puede provocar que la estela se adapte mejor al obstáculo que constituye la barrera, creando menores depresiones tanto en la vía de barlovento como en la de sotavento.

En cualquier caso, serán los ensayos y sus resultados los que muestren si estas suposiciones se cumplen o no, y en que casos se logran mejores soluciones para los trenes planteados en este proyecto.

En lo que se refiere a los huecos inferiores, como ya se ha dicho se cree que es posible que este tipo de solución mejore algo la sustentación, de manera que su influencia ayude a optimizar la estabilidad del tren. Además también pueden ser útiles para reducir el efecto de vacío que se crea tras la barrera y que fuerza a los trenes a contraviento cuando la barrera es muy alta.

Para comparar los resultados de estos nuevos ensayos se van a emplear modelos básicos usados anteriormente, pero simulados nuevamente con las condiciones de mallado y de contorno que ya fueron definidas para estos ensayos

de detalle. Los modelos a los que nos referimos son los que fueron simulados en el anterior ensayo 5, y cuyos resultados se encuentran en el anexo D (Tabla D.1.).

6.3.2.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 6.

A partir de los resultados y conclusiones que fueron deducidos del precedente ensayo 5, se van a plantear exclusivamente aquellos escenarios que han sido calificados como los más restrictivos, en busca de ahorrar lo más posible en cálculos pesados.

Se van a ensayar barreras con deflectores, con huecos inferiores, y combinaciones de ambas sobre escenarios con los dos tipos de trenes, y sobre las dos vías, la de barlovento y la de sotavento. En base a esto se ha dividido el estudio en tres subapartados, a, b y c, con el ánimo de esquematizar mejor los ensayos y sobre todo de ordenar los resultados que se recogen en los anexos.

Se comenzará el estudio con las barreras con deflectores, y por tanto de igual manera, se va a comenzar definiendo su morfología y los parámetros que se van a emplear para su definición.

a) Barreras con deflectores:

El tipo de barrera con deflector que se va a ensayar es la denominada anteriormente como barrera B. Considerar todas las posibles opciones de alero sería un proceso poco productivo y que llevaría mucho tiempo, por tanto se han considerado una serie de medidas para normalizarlas.

Se evaluará un solo ángulo de inclinación del alero de 45° respecto la vertical que forma la barrera, y una altura de 0,5m. El ángulo de inclinación podrá ser hacia dentro de la vía o hacia fuera. La siguiente figura muestra la barrera, con las medidas que la normalizan y con la nomenclatura que se utilizará en adelante para referirse a los ensayos que la contengan.

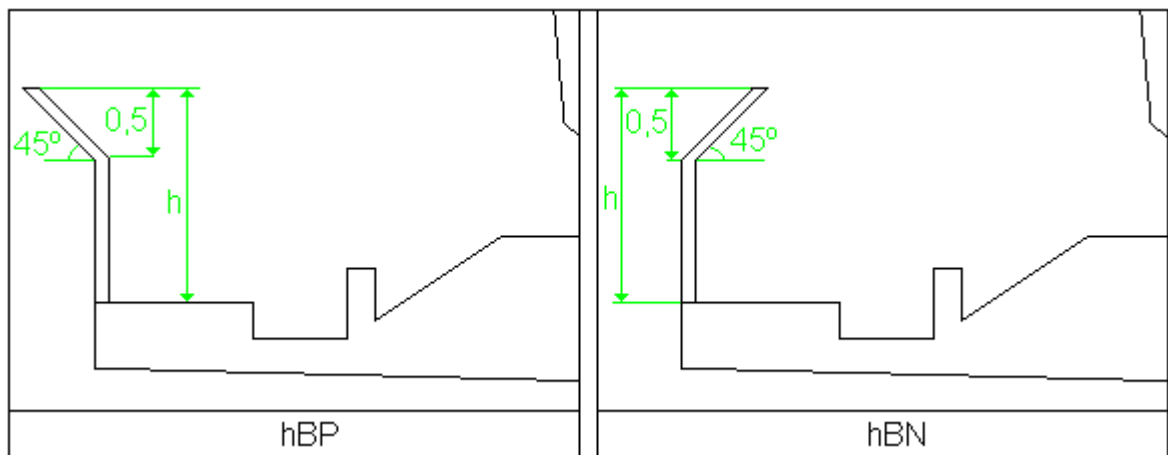


Imagen 6.14: Parámetros y nomenclatura que definen a la barrera denominada como tipo B.

Como se ve en la imagen, este tipo de barreras vienen definidas por dos parámetros:

- h : la altura total respecto al suelo.
- P o N: Se define “p” cuando el alero está orientado hacia el exterior de la vía, y “n” cuando es al revés. El ángulo de inclinación se ha fijado en 45° para todos los modelos, y la altura del tramo de barrera inclinada también es fijo de 0,5 metros.

Estos dos parámetros definen la nomenclatura con la que se va a nombrar los modelos que contengan este tipo de vaya, los primeros dígitos serán la altura (h), luego vendrá la B que marca el tipo de barrera, y posteriormente la orientación elegida (P o N).

b) Barreras con huecos inferiores:

Las barreras con huecos inferiores han sido definidas anteriormente como barreras tipo C. La siguiente imagen muestra el esquema de estas y su nomenclatura:

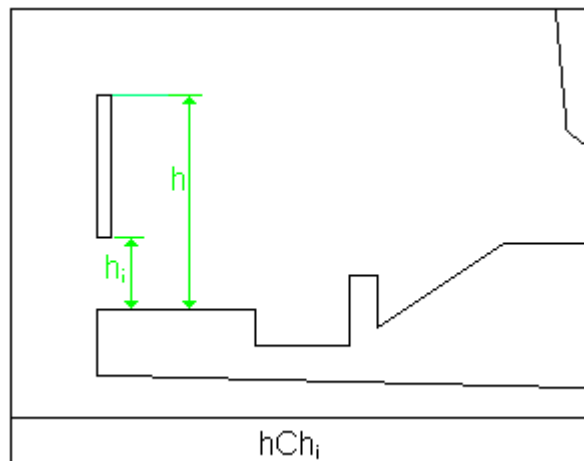


Imagen 6.15: Parámetros y nomenclatura que definen a la barrera denominada como tipo C.

Estas barreras quedarán definidas por dos parámetros:

- h : la altura total respecto al suelo.
- h_i : la altura del hueco inferior también respecto del suelo.

Estos dos parámetros definen la nomenclatura con la que se va a nombrar los modelos que contengan este tipo de parapeto, los primeros dígitos serán la altura (h), luego vendrá la C que marca el tipo de barrera, y posteriormente la altura del hueco (h_i).

c) Barreras con deflectores y huecos inferiores:

Partiendo de las barreras que mejores resultados ofrezcan en los ensayos anteriores, se intentará si procede, buscar soluciones comunes que den aún mejores resultados, es decir, barreras con deflectores y huecos. La siguiente figura muestra este tipo de combinación y su nomenclatura:

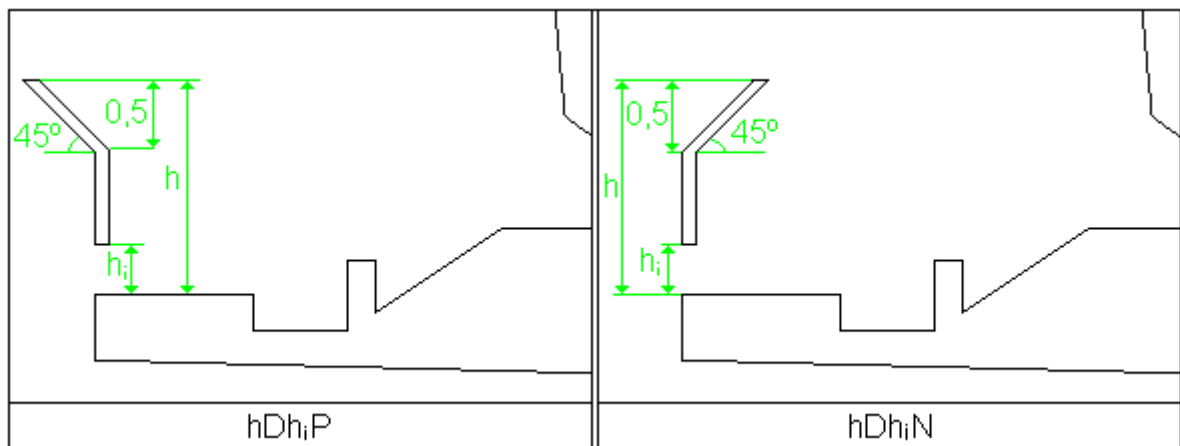


Imagen 6.16: Parámetros y nomenclatura que definen a la barrera denominada como tipo D.

Como se ve en la imagen, estas barreras combinación de las dos anteriores, quedarán definidas por tres parámetros:

- h : la altura total respecto al suelo.
- h_i : la altura del hueco inferior también respecto del suelo.
- P o N: Se define P cuando el alero está orientado hacia el exterior de la vía, y N cuando es al revés. El ángulo de inclinación se ha fijado en 45° para todos los modelos, y al igual que antes, la altura de barrera inclinada también es fija de 0,5 metros.

Estos tres parámetros definen la nomenclatura con la que se va a nombrar los modelos que contengan este tipo de barrera, los primeros dígitos serán la altura (h), luego vendrá la D que marca el tipo y posteriormente la altura del hueco (h_i) seguida de una P o una N en función de la inclinación del alero.

Estos tres análisis se han realizado mediante el método de prueba y error, y por la tanto solo se han ensayado aquellos modelos que merecían atención, por ejemplo si un modelo de barrera es claramente peor que otro en las mismas condiciones, es absurdo simularlo en otras condiciones.

6.3.2.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 6.

Se va a comenzar analizando y representando primero los resultados del análisis de la solución de barrera con aleros, luego se analizarán las barreras con huecos inferiores y por último una combinación de ambas soluciones.

La mayoría de los resultados obtenidos en estos ensayos se encuentran el anexo D, en sus respectivas tablas, aunque aquí también se representarán aquellos que sean de interés y de una forma más visual y fácil de analizar.

Otros resultados no han sido recogidos porque o bien se alejaban mucho de los objetivos del proyecto, o bien eran irrelevantes para el análisis posterior y se han descartado antes de continuar por esa línea de investigación.

a) Barreras con aleros superiores.

La primera idea a comprobar es que inclinación del alero sería la más conveniente de cara a desechar una de las opciones para los desarrollos futuros. Con esta intención se plantearon unos primeros modelos con barreras de 1,5m de altura total, con el alero orientado en los dos sentidos.

Estos modelos se plantean sobre los dos trenes y los dos tipos de vía, y obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla inferior. Junto a ellos también se recogen, coloreados en gris, los resultados de las simulaciones sin barrera y con barrera de 1,5m de altura del ensayo anterior, para poder realizar comparaciones. El tipo de barrera está en base a la nomenclatura explicada en la figura 6.14.

V2B			V2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,8128	0,4041	0A0	1,4346	0,3172
1,5A0	0,2601	0,5940	1,5A0	-0,2791	0,1099
1,5BP	0,0899	0,6115	1,5BP	-0,3424	-0,0057
1,5BN	1,2887	0,3851	1,5BN	0,1150	0,4998
V3B			V3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,9455	1,0577	0A0	0,8897	0,9085
1,5A0	0,5961	0,8331	1,5A0	0,1254	0,3409
1,5BP	0,3919	0,7065	1,5BP	-0,1224	0,3542
1,5BN	0,7005	0,9302	1,5BN	0,3343	0,6429

Tabla 6.24: Resultados de los modelos simulados con barreras de 1,5m de altura y aleros orientados en ambas direcciones.

Estos resultados no dejan lugar a dudas, y su interpretación da lugar a dos conclusiones importantes e igualmente válidas para los dos modelos de trenes estudiados:

- El uso del alero con orientación hacia fuera de la vía (en la nomenclatura definido como P) hace que a efectos de afectación lateral, la barrera parezca más alta de lo que es, aumentando la protección sobre el tren situado en la vía de barlovento, y el efecto vacío que fuerza a contraviento al de sotavento, como haría una barrera simple de más de 1,5m de altura.
- Por el contrario el uso de una barrera con un alero orientado hacia dentro de la vía (en la nomenclatura definido como N), reduce considerablemente el efecto de protección, haciendo que la barrera sea menos eficaz.

Las siguientes cuatro figuras muestran los mapas de presiones de los modelos con los dos tipos de barrera que se están analizando, realizados con el tren 102.

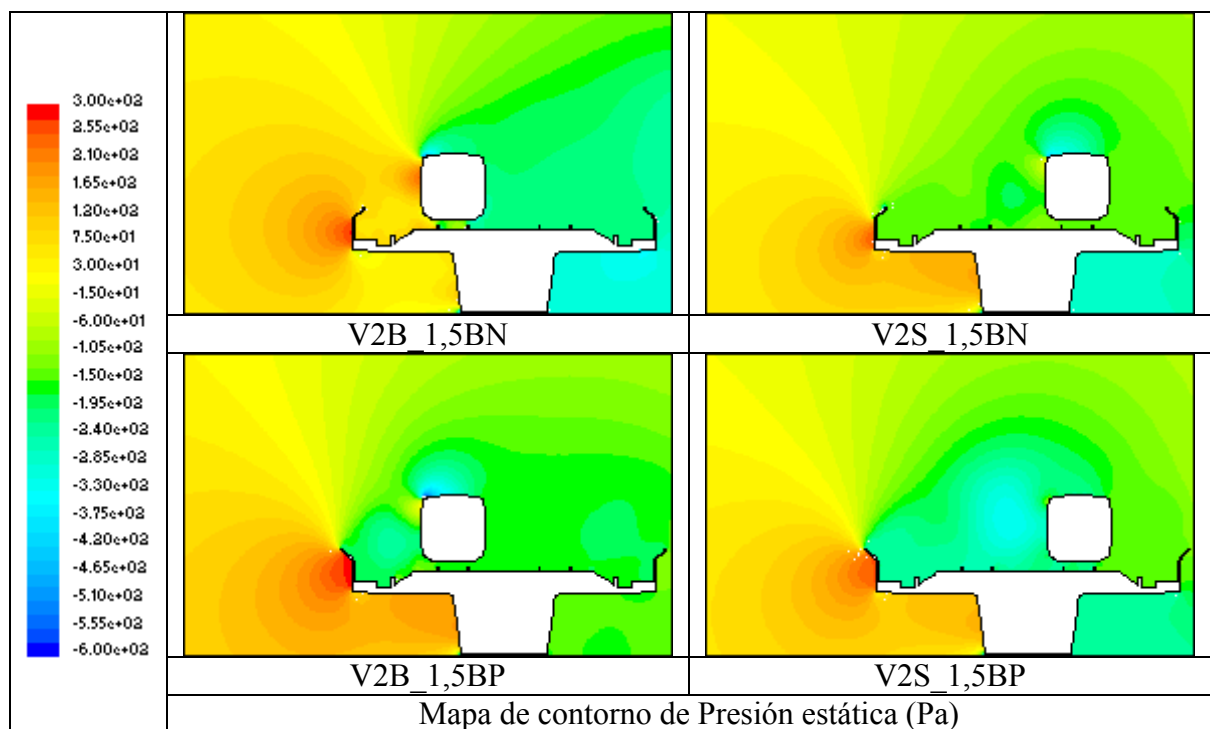


Tabla 6.25: Mapas de presiones de modelos simulados con el tren 102 y barreras con alero de 1,5m de altura total orientadas hacia dentro (imágenes superiores) y hacia fuera (imágenes inferiores).

Estas imágenes permiten explicar visualmente los dos puntos antes mencionados. Se observa como la barrera con alero orientado hacia dentro no es capaz de retener el flujo de aire, creando una fuerte presión sobre la superficie del tren de barlovento, que hace que el C_x sea muy alto. En cambio si es barrera suficiente para proteger al tren situado en la vía de sotavento.

La barrera con alero orientado hacia fuera, retiene la mayor parte de las altas presiones, haciendo que estas sean muy leves en la superficie del tren de barlovento. Para la vía de sotavento, esta protección es, como se ve en la imagen, excesiva, ya que crea una depresión entre ambas vías que fuerza al tren situado en la de sotavento a contraviento.

Por tanto a la vista de estos resultados, y del análisis gráfico, se puede rechazar para futuros desarrollos la solución de barreras con aleros orientados hacia dentro de la vía, ya que este añadido hace que la barrera parezca tener menos altura de la que tiene, y por tanto la protección frente al viento lateral sería mucho menor.

Haciendo una pequeña progresión, se puede estimar que sería necesaria una barrera de 2m de altura total con alero, para llegar a valores de protección similares a los de una barrera simple de 1,5m de altura.

El principal objetivo de este proyecto es reducir la afectación lateral sobre los trenes con el menor material de barrera posible, y por tanto optar por estudiar un complemento que además de encarecer el diseño de las barreras, no aporta una ventaja cualitativa frente a otras soluciones de similares características, está fuera de lugar.

Por tanto el análisis descarta una de las soluciones propuestas para centrarse en la otra, las barreras con aleros superiores orientados hacia fuera, que si presenta unos resultados interesantes.

En vista de estos, se enfoca el estudio hacia conocer que altura de barrera total con alero puede ser la más adecuada. Teniendo en cuenta que el efecto de colocarlo orientado hacia fuera es similar al de aumentar la altura de la barrera, se van a plantear modelos con diferentes alturas, además de la de 1,5m ya expuesta, se realizan ensayos con barreras de 1 y 2 metros.

A la vista de los resultados anteriores, los efectos son parecidos sobre los dos tipos de tren, por tanto estos ensayos se realizan sobre un solo tren. Sus resultados merecen un estudio detallado, y por tanto de nuevo se recurre a la eficacia respecto al modelo sin barrera, para comparar estas soluciones con algunas de las obtenidas en el anterior ensayo.

Tren 102 en vía de Barlovento					Tren 102 en vía de Sotavento				
Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)	Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)
0A0	1,813	0,417			0A0	1,435	0,317		
1,75A0	0,007	0,668	99,62	-59,92	1,75A0	-0,509	-0,070	64,48	78,15
1,5A0	0,260	0,594	85,65	-42,30	1,5A0	-0,279	0,110	80,55	65,33
1BP	0,692	0,461	61,81	-10,43	1BP	0,537	0,576	62,65	-81,37
1,5BP	0,089	0,611	95,04	-46,48	1,5BP	-0,342	-0,006	76,13	98,20
2BP	-0,39	0,043	78,07	89,77	2BP	-0,741	-0,407	48,35	-28,44

Tabla 6.26: Coeficientes Cx y Cy, y eficacia en base a estos coeficientes, de los ensayos realizados con barreras de diferentes alturas y aleros con orientación positiva sobre modelos con el tren 102.

La tabla superior muestra los coeficientes Cx y Cy, y la eficacia de las barreras para las tres configuraciones de parapeto con alero probadas sobre modelos con el tren 102. Si se observan los ratios de eficacia, la barrera que mejores resultados da es la 1,5m de altura, con valores que incluso mejoran en el tren a sotavento los del hasta ahora óptimo, es decir, la barrera simple de 1,75m de altura.

La barrera de 1m con alero se muestra insuficiente para lograr una eficacia comparable a los modelos óptimos. Su baja altura impide la correcta protección del tren situado en la vía de barlovento.

Por otro lado la barrera de 2m de altura con alero es demasiado alta, y por ello induce efectos de vacío grandes en el tren de barlovento, y aún mayores en el de sotavento, por lo tanto tampoco es una altura a considerar para los parámetros del problema planteados. Quizá esta barrera si sería eficaz de cara a proteger trenes más altos.

Por lo tanto, después de analizar los resultados aquí expuestos, y otros que se descartaron durante el proceso de selección de las soluciones a estudiar en este ensayo, se confirma que la barrera con alero que mejor se adapta a los objetivos marcados es la 1,5m de altura total y alero orientado hacia el exterior de la vía.

Queda comprobar si esta solución es mejor o peor que las que se obtuvieron en el ensayo anterior, donde se recuerda al lector que la barrera que resulto óptima para proteger a los trenes en viaducto era la simple de 1,75m de altura.

Se procede ahora por tanto a comparar estas dos soluciones para acabar este análisis de las barreras con alero, de forma que se analice si realmente constituyen una verdadera solución o si la barrera simple es más eficaz además de sencilla.

Ahora se plantean los cuatro modelos (dos trenes y dos emplazamientos) con las barreras de 1,5m de altura y alero orientado hacia fuera (1,5BP). Los resultados de fuerzas y coeficientes se recogen en la tabla C.2 del anexo. Estos valores sin comparar no dicen nada, por lo que se procede a compararlos con los resultados de la barrera de 1,75m simple (1,75A0 en la nomenclatura):

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	99,623	73,606	86,614
Sotavento	64,477	81,678	73,077
Media	82,050	77,642	79,846
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	95,037	58,546	76,792
Sotavento	76,134	86,230	81,187
Media	85,586	72,393	78,989

Tabla 6.27: Comparación en términos de eficacia medida en Cx, entre la barrera simple de 1,75m de altura y la barrera con alero orientado hacia fuera de 1,5m de altura.

Los resultados de la tabla superior muestran que en la práctica se puede decir que la eficacia global de ambas barreras a efectos de afectación lateral es casi la misma. Los matices vienen cuando se analizan estos resultados por grupos.

Se aprecia que la barrera con alero es algo mejor para el tren 103 y algo peor para el 102, pero sin que las diferencias sean realmente significativas.

La gran diferencia se encuentra al evaluar la protección de la barrera sobre la vía de barlovento y sobre la de sotavento. La barrera con alero es menos eficaz para proteger el tren de barlovento, pero reduce considerablemente el efecto de depresión que fuerza al tren de sotavento a contraviento.

Se puede analizar de manera gráfica estas afirmaciones a través de los mapas de vectores de velocidad que se exponen a continuación, correspondientes a los modelos con el tren 103.

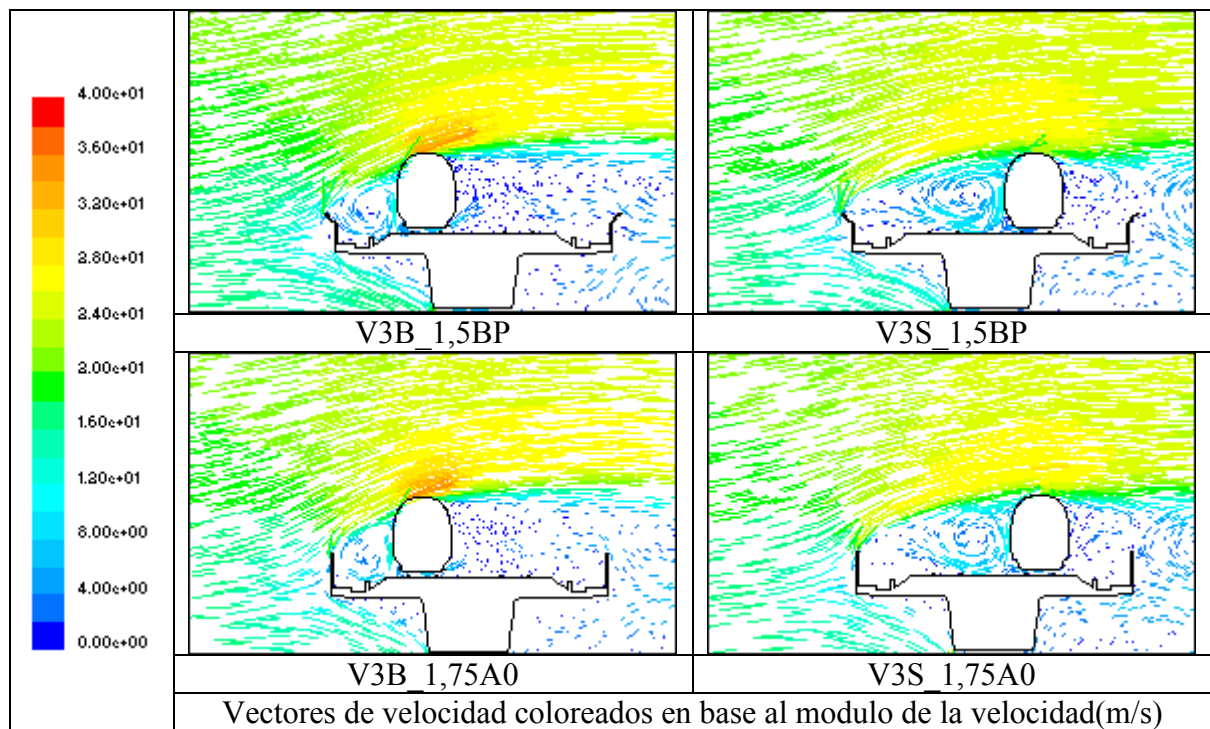


Tabla 6.28: Mapas vectores de velocidad coloreados en base al modulo de la velocidad de modelos simulados con el tren 103 y barreras con alero orientado hacia fuera de 1,5m de altura total (imágenes superiores) y barreras simples de 1,75m de altura (imágenes inferiores).

La barrera con alero, como se aprecia en la imagen superior derecha, no es capaz de levantar completamente la estela por encima del tren, impactando en el costado y provocando un mayor C_x que en el caso representado justo abajo, donde la estela prácticamente no golpea al tren situado en la vía de barlovento.

En cuanto a las diferencias sobre la vía de sotavento, la barrera con alero crea un remolino mayor que la simple de 1,75m, lo que en un principio debería aumentar el efecto vacío. Pero aunque este remolino es mayor, su centro está más desplazado hacia el centro de la infraestructura, y por tanto la fuerza que crea esta depresión sobre el tren situado en la vía de sotavento es algo menor.

Por lo tanto en parte se consigue con la barrera con alero uno de los objetivos planteados de reducir este efecto vacío, pero a costa de bajar un poco la protección sobre el tren de barlovento.

Se ha realizado una tabla con idéntica comparación con el coeficiente C_y , que marca la afectación vertical:

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-65,221	31,171	-17,025
Sotavento	78,154	68,323	73,239
Media	6,467	49,747	28,107
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-51,334	33,206	-9,064
Sotavento	98,201	61,015	79,608
Media	23,434	47,110	35,272

Tabla 6.29: Comparación en términos de eficacia medida en Cy, entre la barrera simple de 1,75m de altura y la barrera con alero orientado hacia fuera de 1,5m de altura.

A la vista de estos coeficientes, la barrera con alero presenta una ligera mejora frente a la simple en cuanto a afectación vertical. Esta diferencia no es muy significativa, ni se produce con igual medida en todos los trenes.

Lo más destacable de estos datos es ver como la barrera con alero consigue reducir casi a cero la sustentación en el tren 102 situado a sotavento, lo que redunda en una mejora de su estabilidad.

Teniendo en cuenta el análisis de ambos coeficientes, la solución de barrera con alero de 1,5m de altura obtiene resultados buenos, y de momento es la mejor solución de las planteadas hasta ahora.

b) Barreras con huecos inferiores.

Se plantea este análisis de barreras con huecos inferiores como un análisis aparte del anterior de barreras con aleros, aunque se ha tenido en cuenta para su desarrollo y comparación los resultados de éste, con el principal objetivo de seguir mejorando la protección frente al viento lateral en los trenes.

Después de realizar una serie de análisis de criba, se decide afrontar el estudio de 4 posibles soluciones, que se considera pueden resultar adecuadas. Ante la diferencia de resultados dependiendo del tren empleado, se han planteado estas cuatro soluciones en ambos trenes y en ambas vías, lo que por tanto, constituye un total de 16 modelos a analizar.

Las cuatro barreras que se van a ensayar en los modelos son (con su nomenclatura según la figura 6.15):

- Barrera de 1,5m de altura con hueco inferior de 0,2m (1,5C0,2).

- Barrera de 1,5m de altura con hueco inferior de 0,4m (1,5C0,4).
- Barrera de 2m de altura con hueco inferior de 0,2m (2C0,2).
- Y barrera de 2m de altura con hueco inferior de 0,4m (2C0,4).

Por tanto se va a simular con barreras de dos alturas diferentes y con dos huecos, uno pequeño de 20cm y otro algo más grande de 40cm. De esta forma se cubre un abanico de opciones diverso que puede dar una idea de la eficacia de estos parapetos.

Primero se va a particularizar un poco en las barreras con diferentes alturas, para ver la influencia que tiene el hueco en la protección que sobre el tren proporcionan dichas barreras.

Se presentan en la siguiente tabla los resultados de la barrera de 1,5m de altura y se comparan con los de la de misma altura pero sin hueco inferior y con los del modelo sin barrera, ambos coloreados en gris.

V2B			V2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,8138	0,4041	0A0	1,4346	0,3172
1,5A0	0,2601	0,5940	1,5A0	-0,2791	0,1099
1,5C0,2	0,5247	0,5460	1,5C0,2	0,0880	0,3605
1,5C0,4	0,8340	0,5418	1,5C0,4	0,3804	0,5271
V3B			V3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,9455	1,0577	0A0	0,8897	0,9085
1,5A0	0,5961	0,8330	1,5A0	0,1254	0,3409
1,5C0,2	0,5176	0,7471	1,5C0,2	0,3482	0,4010
1,5C0,4	0,6844	0,7903	1,5C0,4	0,3798	0,5584

Tabla 6.30: Coeficientes Cx y Cy para las barreras de 1,5m de altura con diferentes alturas de hueco.

A continuación la misma tabla pero para una altura de barrera de 2m.

V2B			V2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,8138	0,4041	0A0	1,4346	0,3172
2A0	-0,2266	0,4368	2A0	-0,6784	-0,2758
2C0,2	0,1010	0,4012	2C0,2	0,0121	0,1806
2C0,4	0,4722	0,4427	2C0,4	0,0503	0,2541
V3B			V3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,9455	1,0577	0A0	0,8897	0,9085
2A0	-0,1094	0,4933	2A0	-0,3405	0,1302
2C0,2	0,1422	0,4133	2C0,2	-0,0029	0,3689
2C0,4	0,3295	0,6185	2C0,4	0,1297	0,3786

Tabla 6.31: Coeficientes Cx y Cy para las barreras de 2m de altura con diferentes alturas de hueco

A la vista de estos resultados se saca la conclusión de que el hueco inferior reduce la eficacia de la barrera, haciendo aumentar el Cx respecto a una barrera sin él, y este aumento se produce con mayor intensidad conforme crece la altura del hueco. Este efecto se hace notable en ambos trenes, aunque lo es más en el tren 103.

Por tanto las barreras con el hueco grande de 0,4m se hacen ineficaces, ya que es excesivo y la barrera pierde capacidad de protección del tren de barlovento. Parece más razonable optar por las barreras con menor altura de hueco.

En cuanto a la sustentación, representada por Cy, si se comparan los resultados de las barreras con hueco con los de la barrera sin él de misma altura, este aumenta la sustentación en los trenes de sotavento y la disminuye en los trenes de barlovento.

Una vez descartados el modelo de barrera con hueco de 40cm, se centra el estudio en las que tienen un hueco de 20cm. Se presenta en la siguiente tabla los resultados de estos modelos y al igual que antes, además de presentar el valor de los coeficientes, también se presenta el de la eficacia respecto a la misma situación sin barrera, y los de la barrera de 1,75m de altura simple para comparar resultados.

Tren 102 en vía de Barlovento					Tren 102 en vía de Sotavento				
Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)	Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)
0A0	1,813	0,417			0A0	1,435	0,317		
1,75A0	0,007	0,668	99,62	-59,92	1,75A0	-0,509	-0,070	64,48	78,15
1,5C0,2	0,525	0,546	71,06	-30,80	1,5C0,2	0,088	0,361	93,87	-13,66
2C0,2	0,101	0,401	94,43	3,89	2C0,2	0,012	0,181	99,15	43,07
Tren 103 en vía de Barlovento					Tren 103 en vía de Sotavento				
Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)	Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)
0A0	0,945	1,058			0A0	0,890	0,908		
1,75A0	0,250	0,728	73,61	31,17	1,75A0	-0,163	0,288	81,68	68,32
1,5C0,2	0,684	0,790	27,62	25,284	1,5C0,2	0,348	0,401	60,87	55,86
2C0,2	0,142	0,413	84,96	60,928	2C0,2	-0,003	0,369	99,67	59,39

Tabla 6.32: Tabla de coeficientes y su eficacia para comparar los modelos de barrera con hueco inferior de 20cm y alturas de 1,5 y 2m, con los modelos sin barrera y con barrera de 1,75m simple.

Antes de particularizar el análisis en los resultados de esta barrera, se van a comentar algunas generalidades observadas para las barreras con hueco inferior:

- Las barreras con hueco inferior consiguen reducir el efecto de vacío que se formaba en la vía de sotavento.
- Comparadas con barreras de su misma altura, el optar por colocar un hueco inferior reduce notablemente la sustentación sobre el tren.

Entre los resultados de la tabla anterior, hay unos que llaman poderosamente la atención, son los de la barrera de 2m de altura con hueco inferior de 0,2m. Los resultados de esta barrera son excelentes para los trenes de sotavento, y muy buenos también para los de barlovento.

Si se observa la eficacia en Cx, está es mayor del 80% en todos los casos, y para los trenes de sotavento es del 99%. Esto quiere decir que esta barrera reduce la afectación lateral casi a cero.

Como se ha realizado antes, se van a comparar estos resultados con los obtenidos en anteriores ensayos, para seguir con el proceso de optimización de la forma de la barrera. El siguiente cuadro compara estos resultados en términos exclusivamente de eficacia en Cx con los de la barrera de 1,75m de altura simple, y los de la de alero de 1,5m de altura, que son las que hasta ahora han obtenido los resultados óptimos.

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	99,623	73,606	86,614
Sotavento	64,477	81,678	73,077
Media	82,050	77,642	79,846
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	95,037	58,546	76,792
Sotavento	76,134	86,230	81,187
Media	85,586	72,393	78,989
Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	94,426	84,963	89,694
Sotavento	99,153	99,674	99,414
Media	96,790	92,319	94,554

Tabla 6.33: Comparación en términos de eficacia medida en Cx, entre la barrera simple de 1,75m de altura, la barrera con alero de 1,5m y la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

En este cuadro se aprecia claramente como los resultados de esta barrera se pueden considerar óptimos desde todos los puntos de vista. Es mejor en todos los casos, tanto para los dos tipos de tren como para las dos situaciones de vía, ya que prácticamente mejora o iguala todos los registros anteriores. La gran ventaja es sobre todo que consigue unos resultados óptimos para el tren situado en la vía de sotavento, ya que reduce a cero la depresión que forman las barreras sin hueco.

Se hace idéntico análisis con los valores de Cy.

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-65,221	31,171	-17,025
Sotavento	78,154	68,323	73,239
Media	6,467	49,747	28,107
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-51,334	33,206	-9,064
Sotavento	98,201	61,015	79,608
Media	23,434	47,110	35,272
Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	0,716	60,930	30,822
Sotavento	43,068	59,391	51,230
Media	21,892	60,160	41,026

Tabla 6.34: Comparación en términos de eficacia medida en Cy, entre la barrera simple de 1,75m de altura, la barrera con alero de 1,5m y la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

Respecto a los coeficientes C_y , se observa que la barrera con hueco mejora la sustentación en el tren de barlovento, mientras que la empeora en el tren de sotavento, pero si se tiene en cuenta que reduce la afectación lateral en los trenes que circulan por esta vía, este empeoramiento de la sustentación es casi irrelevante.

Hablando en términos globales, la mejora de la sustentación es evidente, y por tanto, teniendo en cuenta tanto los resultados de C_x como los de C_y , es obvio que la barrera es óptima, de resultados difíciles de mejorar.

Es óptima sobre todo porque logra reducir el tan nombrado efecto vacío que se produce en la vía de sotavento y fuerza a los trenes que circulan por ella a contraviento. Las dos imágenes siguientes muestran el caso del tren 102 por poner un ejemplo, aunque no existen grandes diferencias entre los resultados de los dos trenes.

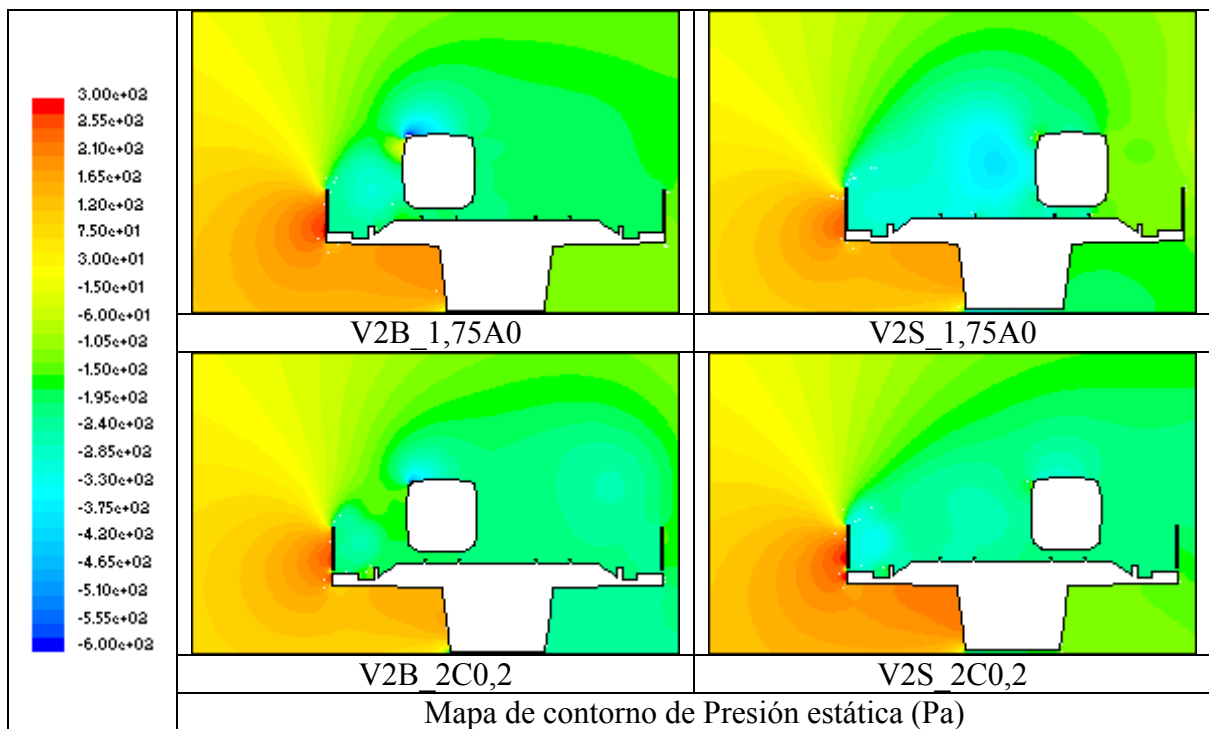


Tabla 6.35: Mapas de contorno de presión de modelos simulados con el tren 102 para comparar barreras simples de 1,75m de altura (imágenes superiores) con barreras de 2m de altura con hueco inferior de 20cm(imágenes inferiores).

Estos planos de presiones son bastantes útiles para explicar dos efectos que se consiguen con la barrera con hueco inferior que no se conseguían con, por ejemplo, la barrera de 1,75m simple.

- Al ser una barrera más alta desvía el flujo por encima del tren de barlovento, creando una menor depresión en la parte alta que causa la sustentación. Esta es la causa de que el C_y sea algo menor.
- Respecto al tren de la vía de sotavento, se aprecia claramente como el hueco inferior en la barrera reduce la zona de depresión fuerte a justo detrás de esta, con lo que el tren apenas se ve afectado por esta presión y no se ve forzado ni a favor ni en contra del viento.

Es decir una barrera de mayor altura, y el hueco inferior consiguen un doble efecto beneficioso, proteger más al tren sin causar depresiones en la vía de sotavento. Estos mapas de vectores de velocidad, ahora con el 103, muestran el comportamiento de la estela y del remolino que causa la depresión, comparándolos con la otra barrera que ha dado buenos resultados, la de 1,5m de altura con alero orientado hacia fuera.

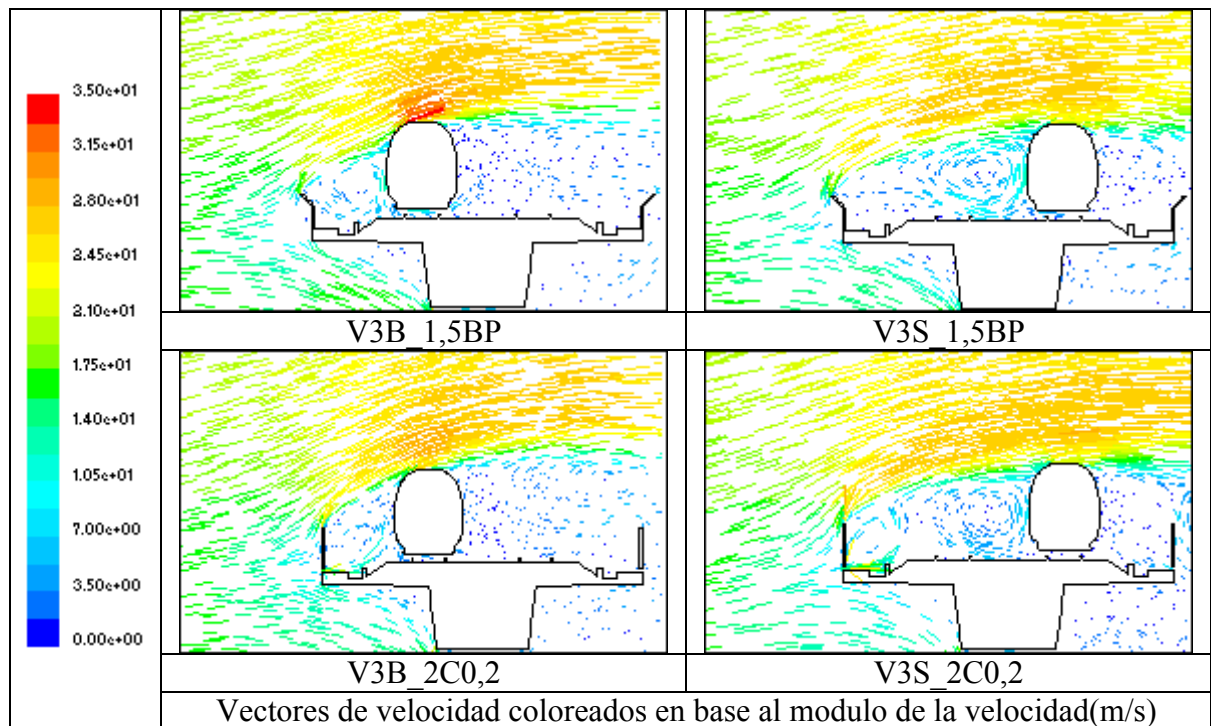


Tabla 6.36: Mapas vectores de velocidad coloreados en base al modulo de la velocidad de modelos simulados con el tren 103 para comparar barreras con alero orientado hacia fuera de 1,5m de altura total (imágenes superiores) y barreras con hueco inferior de 20cm y 2m de altura (imágenes inferiores).

En las imágenes de la derecha se aprecia como al ser la barrera más alta consigue desviar la estela por encima del tren de barlovento, mientras que el flujo de aire que entra por debajo del hueco rompe el remolino que se crea entre esta y el tren.

En el caso del tren de sotavento, el hueco se puede decir que actúa como vía de escape del remolino, al entrar aire a presión por este, el remolino se compacta y reduce su intensidad, como se observaba en el mapa de presiones, lo que se traduce en una menor depresión sobre la superficie del tren de sotavento.

c) Barreras con deflectores y huecos inferiores:

Los resultados obtenidos en el anterior ensayo son difíciles de mejorar, pero con el objetivo ahora de seguir profundizado en el análisis se va propone para terminar este estudio sobre viaducto, una barrera que combine las dos soluciones que mejores resultados han dado, la barrera con alero orientado hacia fuera y la barrera con hueco inferior.

Después de los resultados hasta ahora expuestos, se ha simulado una barrera de 2m de altura total, con alero orientado hacia fuera, y con un hueco inferior de 20cm. A priori puede ser una buena solución ya que combina dos aspectos que han dado buenos resultados.

Esta barrera se ha simulado sobre los dos trenes obteniéndose los siguientes resultados de C_x , C_y y de sus respectivas eficacias que se presentan en la tabla D.4 y a continuación junto con los modelos simulados con barrera de 2m de altura y hueco inferior de 20cm y los modelos sin barrera, estos dos últimos coloreados en gris.

Tren 102 en vía de Barlovento					Tren 102 en vía de Sotavento				
Ensayo	C_x	C_y	Efic. $C_x(\%)$	Efic. $C_y(\%)$	Ensayo	C_x	C_y	Efic. $C_x(\%)$	Efic. $C_y(\%)$
0A0	1,813	0,417			0A0	1,435	0,317		
2C0,2	0,101	0,401	94,43	3,89	2C0,2	0,012	0,181	99,15	43,07
2D0,2P	0,075	0,300	95,84	28,18	2D0,2P	0,037	0,106	97,43	66,64
Tren 103 en vía de Barlovento					Tren 103 en vía de Sotavento				
Ensayo	C_x	C_y	Efic. $C_x(\%)$	Efic. $C_y(\%)$	Ensayo	C_x	C_y	Efic. $C_x(\%)$	Efic. $C_y(\%)$
0A0	0,945	1,058			0A0	0,890	0,908		
2C0,2	0,142	0,413	84,96	60,93	2C0,2	-0,003	0,369	99,67	59,39
2D0,2P	0,046	0,389	95,14	63,21	2D0,2P	-0,051	0,120	94,29	86,78

Tabla 6.37: Tabla de coeficientes y su eficacia para comparar los modelos de barrera con hueco inferior de 20cm, alero orientado hacia fuera, y altura de 2m, con los modelos sin barrera y con barrera de 2m de altura y hueco inferior de 20cm.

Los resultados son similares a los obtenidos anteriormente con la barrera de misma altura y hueco pero sin alero. De nuevo se realizará una comparación

entre esta nueva barrera con hueco y alero, y la barrera solo con hueco (ambas de 2 metros de altura), para evaluar en términos globales cuál es mejor solución.

Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	94,426	84,963	89,694
Sotavento	99,153	99,674	99,414
Media	96,790	92,319	94,554
Eficacia en % de la barrera de 2D0,2P evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	95,838	95,138	95,488
Sotavento	97,434	94,290	95,862
Media	96,636	94,714	95,675

Tabla 6.38: Comparación en términos de eficacia medida en Cx, entre la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total y la barrera de misma altura, hueco inferior también de 20cm y alero orientado hacia fuera.

Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	0,716	60,930	30,822
Sotavento	43,068	59,391	51,230
Media	21,892	60,160	41,026
Eficacia en % de la barrera de 2D0,2P evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	25,806	63,210	44,508
Sotavento	66,639	86,781	76,710
Media	46,223	74,996	60,609

Tabla 6.39: Comparación en términos de eficacia medida en Cy, entre la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total y la barrera de misma altura, hueco inferior también de 20cm y alero orientado hacia fuera.

Observando los resultados, no cabe duda de que la barrera con hueco y alero es la mejor solución posible, en cuanto al coeficiente Cx no existe gran diferencia entre una y otra, pero en cuanto a la sustentación, la barrera con el alero muestra una gran ventaja, mejorando a la estudiada en el anterior ensayo en todos los modelos.

Hay dos grandes diferencias entre ambas barreras que merece la pena destacar:

- La nueva barrera con hueco y alero, mejora la sustentación (representada por Cy) respecto a la anterior, que solo tenía el hueco, en todos los casos, y además en la mayoría lo hace de forma notable.

- Apenas hay diferencias entre los resultados de afectación lateral representados por C_x , salvo en el caso del tren 103 a barlovento, donde los mejora en casi 10 puntos porcentuales.

Estos dos aspectos son muy significativos, a continuación se presentan los mapas de velocidades de las simulaciones correspondientes al tren 103 con la barrera con hueco y alero que se está estudiando, y con las barreras con hueco pero sin alero, para comparar resultados.

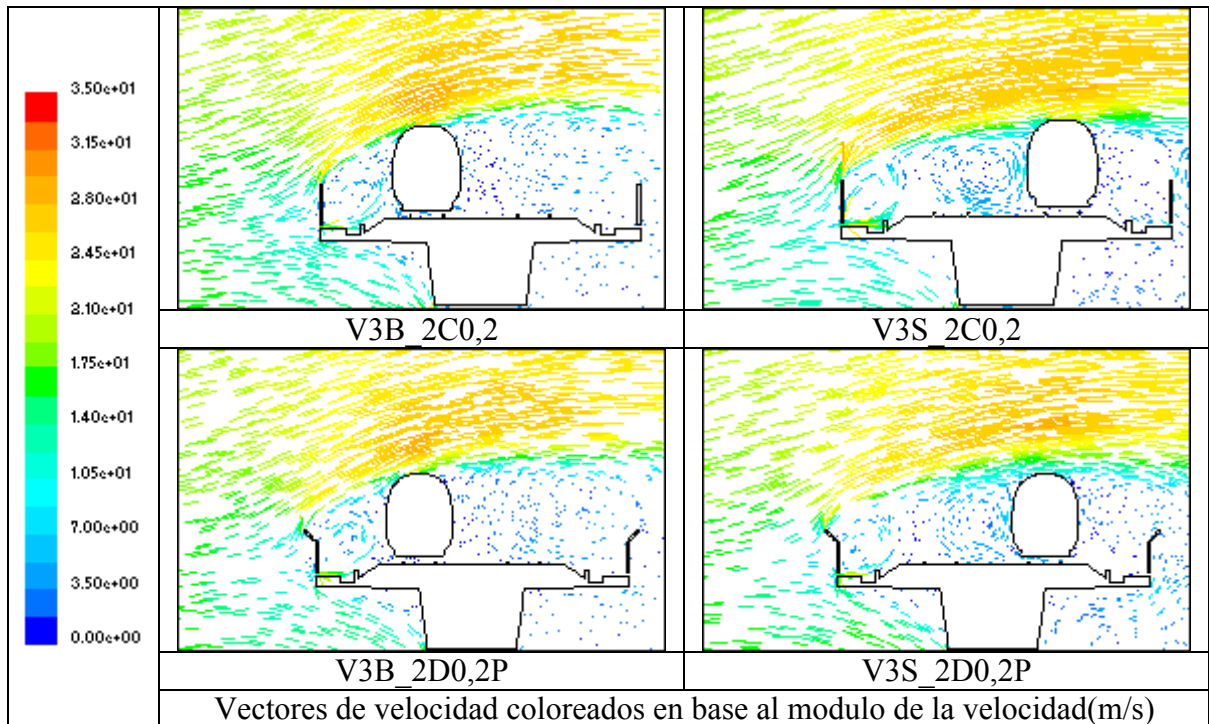


Tabla 6.40: Mapas vectores de velocidad coloreados en base al modulo de la velocidad de modelos simulados con el tren 103 para comparar barreras con hueco inferior de 20cm y 2m de altura (imágenes superiores), con las barreras con alero orientado hacia fuera de igual altura total y altura de hueco.(imágenes inferiores).

Como se observa en las imágenes, la estela pasa mucho más alta en el caso de las barreras con alero, lo que produce que en la parte superior del tren la velocidad del viento no sea tan alta reduciéndose la sustentación. Es por este motivo por el que los valores de C_y son mejores en el caso de barreras con alero.

Además estas imágenes también valen para justificar la mejora que se produce sobre el tren 103 a barlovento, a efectos de afectación lateral. Como se aprecia en las figuras de la derecha, la barrera sin alero no es capaz de hacer que la estela pase por encima del tren completamente, golpeando un poco en su

lateral, mientras que la barrera con alero si hace que la estela pase por encima del techo del tren.

El hecho de que el tren 103 sea más alto que el 102 es lo que implica que para este último no existan prácticamente diferencias en cuanto a afectación lateral entre el tren protegido por la barrera con alero y hueco y el protegido por la barrera con hueco.

Las mejoras en el aspecto de la sustentación que consigue esta nueva barrera, unido a la mejora en la afectación lateral que produce sobre el tren 103, de mayor altura, sin afectar negativamente al tren 102, hace que la barrera de dos metros de altura, con alero y hueco de 20cm, se convierta en una solución casi perfecta en todos los aspectos.

6.3.2.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 6.

Este ensayo 6 y su análisis han profundizado en diferentes medidas y soluciones aerodinámicas en busca de reducir al máximo la afectación lateral sobre los trenes cuando circulan por viaducto, objetivo este que se ha cumplido con muy buenos resultados.

La primera solución que se ha probado ha sido la de barreras con alero. Los resultados y el análisis han demostrado que el hecho de introducir un alero en la barrera orientado hacia el exterior de la vía es equivalente a aumentar su altura a efectos de fuerzas aerodinámicas sobre el tren.

Además también se comprobó como la barrera con alero de 1,5m consigue mitigar en parte el efecto vacío que fuerza al tren de sotavento a contraviento, y mejora la sustentación por lo que se convierte en una medida más eficaz que la barrera de 1,75m simple.

Por tanto los datos y el análisis demuestran que esta primera solución del alero es eficaz, constituye una mejora aerodinámica de cierta importancia, y permite con menor altura de barrera conseguir protecciones más eficaces que las que aportan las simples de mayor altura.

Ya se había probado que a mayor altura de barrera mayor protección en el tren de la vía de barlovento, pero surgía siempre el inconveniente de las depresiones que se causaban tras esta que afectaban al de la vía de sotavento.

La segunda mejora aerodinámica, el hueco inferior, consigue disminuir casi a cero este efecto de vacío en los alrededores de la vía de sotavento.

Desaparecida esta limitación, ya se puede emplear la barrera de 2m de altura que protege casi de forma completa al tren de la vía de barlovento, siempre que se instale con el hueco inferior justo para reducir depresiones.

Las simulaciones realizadas, y los análisis posteriores han permitido determinar el hueco óptimo que reduce casi a cero la afectación lateral en el tren de sotavento y no merma la protección del tren de barlovento. Una altura de hueco de 20cm en una barrera de 2m de altura total da unos resultados casi perfectos, en cuanto a que la afectación lateral sobre el tren se reduce hasta valores casi despreciables.

Estos resultados ya cumplían con el objetivo marcado para este ensayo, pero se siguió adelante ensayando una solución que combinaba las dos anteriores buscando una optimización mediante el diseño de barreras con alero y hueco inferior.

Los resultados muestran como estos prototipos de barrera dan unos resultados aún mejores, reducen la afectación lateral en todas las situaciones a casi cero, y reducen considerablemente la sustentación lo cual mejora la estabilidad de forma indirecta.

La solución de barrera de 2m de altura con hueco inferior de 20cm y alero orientado hacia el exterior de la vía consigue hacer que en viaducto el tren se vea sometido a esfuerzos casi despreciables, reduciendo la afectación dinámica por causa del viento a valores muy bajos.

6.3.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LAS BARRERAS PARA-VIENTO EN LA CONFIGURACIÓN DE VIADUCTO.

Las valoraciones de los anteriores ensayos valen perfectamente como conclusiones de este apartado centrado en reducir la afectación de los trenes por viento lateral en configuración de vía en viaducto.

Los dos ensayos realizados, con 48 simulaciones en total, han permitido alcanzar el objetivo fijado de obtener una solución en forma de barrera capaz de proteger a los dos trenes propuestos cuando se encuentran sobre esta

configuración, que como se vio en los ensayos previos, era la más restrictiva pues las fuerzas sobre los trenes eran más peligrosas.

Estos ensayos han permitido ir avanzando en soluciones cada vez mejores, que en base a los conocimientos que se iban acumulando, conseguían ir perfeccionando el diseño, hasta conseguir una solución que se puede considerar óptima para las condiciones del problema planteado.

Esta solución óptima es la barrera de 2m de altura total, con alero orientado hacia el exterior de la vía, y con un hueco inferior de 20cm, como la que se muestra en la figura.

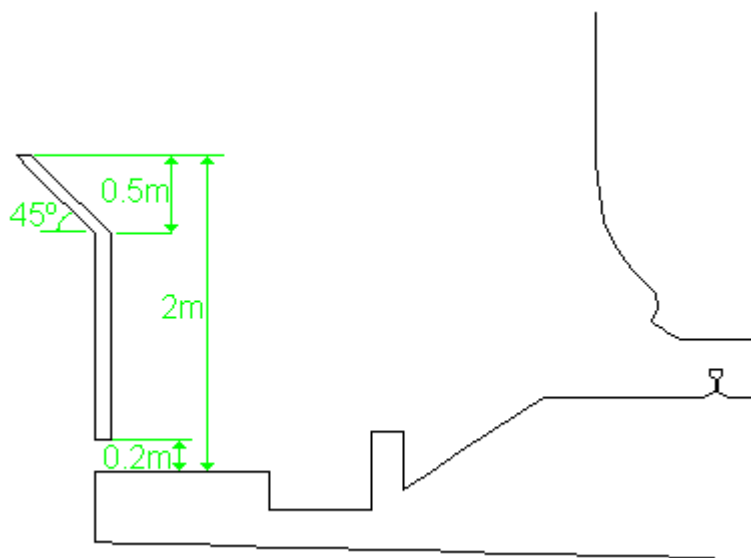


Imagen 6.17: Esquema de la barrera que según los estudios y análisis realizados, da resultados óptimos para la configuración de vía en viaducto.

Pero además se han conseguido otros resultados y análisis que pueden ser de gran interés si se busca el desarrollo de barreras para otras condiciones de operación, y que se encuentran recogidos en los apartados de análisis y valoraciones de los respectivos ensayos 5 y 6.

Por ejemplo se ha demostrado que el empleo de un alero orientado hacia fuera hace que la altura de la barrera parezca mayor de la que realmente es, a la vez que reduce en parte el efecto vacío que se genera en la vía de sotavento.

Esta idea es de gran importancia, ya que por consideraciones paisajísticas, se puede reducir la altura de la barrera para que los pasajeros puedan contemplar

el paisaje desde sus ventanillas, sin perder efectividad en la barrera. Por tanto los aleros pueden ser una solución muy importante si se quiere tener en cuenta aspectos como este.

Otra conclusión que se puede hacer de estos análisis en detalle sobre viaducto, es el hecho de que el hueco inferior constituye una gran solución de cara a mejorar la efectividad de las barreras. Se ha demostrado que con él se consiguen mejores resultados, pero además es un recurso que favorece la reducción de costes de material.

Con lo que además de obtener una barrera óptima para la configuración de vía y trenes propuestos, con este análisis, se han obtenido una serie de valoraciones que pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de medidas eficaces en otras condiciones de problema, sin tener que partir de un estudio previo como el que avala estos ensayos.

Además estos resultados servirán de base al posterior análisis de vía en terreno firme, ya que hay consideraciones que pueden ser perfectamente aplicables a esta configuración de vía que se aborda a continuación, y por tanto, se estima que reducirán el número de ensayos necesarios para conseguir una barrera óptima en terraplén.

6.4. OPTIMIZACIÓN DE LA BARRERA DE PROTECCIÓN LATERAL EN LA CONFIGURACIÓN DE VÍA SOBRE TERRAPLÉN.

A continuación se presenta un estudio semejante al anterior pero para la configuración de vía sobre terraplén. Será más somero, fundamentalmente porque partiendo de los resultados anteriores se puede extrapolar muchas de las soluciones a la configuración de terraplén, o incluso puede que sean válidas las mismas.

Además como se vio en los ensayos previos, la situación de vía en terraplén es menos comprometida en lo que a esfuerzos por vientos laterales se refiere, y solo serán necesarias soluciones a modo de parapeto en lugares muy concretos, fuertemente afectados por ráfagas de viento.

Al igual que en el caso de vía en viaducto, primero se va a realizar un estudio para analizar con los nuevos parámetros de la simulaciones en detalle las

barreras tipo A que resultan óptimas. Además este primer ensayo servirá para poder comparar las nuevas soluciones que se propongan.

Después se planteará un ensayo, para en base a los resultados de viaducto, comprobar si las barreras que daban buenos resultados en esta configuración son también válidas para la de terraplén, y en caso de que no lo fuesen determinar que parámetros habría que variar para conseguir resultados de protección realmente eficaces en esta infraestructura.

El objetivo es el de dar con un diseño de barrera que sea lo más eficaz posible de cara a proteger del viento a las circulaciones ferroviarias que circulen por terraplén en terrenos afectados por fuertes rachas de viento.

6.4.1.- ENSAYO 7: OPTIMIZACIÓN DE LA ALTURA DE LA BARRERA PARA LA CONFIGURACIÓN DE VÍA EN TERRAPLÉN.

Al igual que en viaducto, estos ensayos de optimización tienen un nuevo planteamiento en cuanto a mallados y en cuanto al modelo de resolución. Esto introduce cambios en los resultados, que obliga a repetir algunos de los ensayos anteriores en estas nuevas condiciones para poder comparar con los nuevos resultados que se obtendrán en los siguientes ensayos.

6.4.1.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 7.

La justificación de este ensayo es semejante a la que se planteó en el ensayo 5; con él se busca obtener resultados más precisos en modelos que ya fueron simulados anteriormente, con dos motivaciones principalmente, primero tener con que comparar los nuevos resultados que se obtengan en adelante simulados en iguales condiciones, y segundo para determinar con exactitud la altura de barrera óptima, ya que este es un parámetro muy relevante y de gran interés.

6.4.1.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 7.

A partir de los resultados y conclusiones de los ensayos previos, se dedujo que la altura óptima de barrera se encontraba entre los 1,5 y los 2 metros, tanto para la configuración de vía en terraplén que nos ocupa, como para la de viaducto ya estudiada.

En base a estos resultados se va a plantear este ensayo, y con esta acotación de alturas, se van a simular de nuevo los modelos con tres alturas de barrera: 1'5, 1'75, y 2 metros. Además de los modelos sin barrera para que sirvan como patrón para comparar.

En total este ensayo estará compuesto por 16 simulaciones, cuatro alturas a simular sobre dos tipos de trenes y sobre las dos vías, barlovento y sotavento. La siguiente tabla recoge las simulaciones que se van a realizar en este ensayo, así como la nomenclatura empleada para referirse a ellas.

Terraplén/ Viaducto	Tipo de tren	Barlovento/Sotavento	Altura barrera	Nomenclatura de la simulación.
Simulaciones con vía en terraplén	Tren TALGO 102	Tren a barlovento	0	T2B_0A0
			1,5	T2B_1,5A0
			1,75	T2B_1,75A0
			2	T2B_2A0
		Tren a sotavento	0	T2S_0A0
			1,5	T2S_1,5A0
			1,75	T2S_1,75A0
			2	T2S_2A0
	Tren SIEMENS 103	Tren a barlovento	0	T3B_0A0
			1,5	T3B_1,5A0
			1,75	T3B_1,75A0
			2	T3B_2A0
		Tren a sotavento	0	T3S_0A0
			1,5	T3S_1,5A0
			1,75	T3S_1,75A0
			2	T3S_2A0

Tabla 6.41: Simulaciones que conforman el ensayo 7 y su nomenclatura en la última columna.

6.4.1.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 7.

Al igual que en otros ensayos, el lector puede encontrar todos los resultados aquí representados y analizados en el anexo D (Tabla D.5). La siguiente tabla muestra los coeficientes aerodinámicos clasificados por tipo de tren y por vía, los resultados del tren 102 son los superiores y los del 103 los inferiores, los de la vía de barlovento los de la izquierda y los de sotavento en la parte derecha.

T2B			T2S		
Altura	Cx	Cy	Altura	Cx	Cy
0	1,35712124	0,27195671	0	1,20613727	0,29285015
1,5	0,45842203	0,34981433	1,5	-0,19619429	-0,13165772
1,75	0,09999847	0,42545886	1,75	-0,37291752	-0,03111209
2	-0,15949453	0,2924187	2	-0,48795684	-0,17839716
T3B			T3S		
Altura	Cx	Cy	Altura	Cx	Cy
0	0,73391634	0,74167328	0	0,62464034	0,643241
1,5	0,25516888	0,60685995	1,5	-0,08977805	0,28839791
1,75	0,06083906	0,61734661	1,75	-0,25645901	0,1620824
2	-0,10612382	0,48378217	2	-0,38324955	0,0578433

Tabla 6.42: Valores de los coeficientes aerodinámicos del ensayo 5.

Los valores de la tabla anterior muestran como los coeficientes C_x que representan la afectación lateral, disminuyen al aumentar la altura de la barrera, hasta alcanzar incluso valores negativos a partir de cierta altura de esta.

En este análisis no se va a entrar en comparaciones profundas entre diferentes tipos de trenes ni de emplazamiento, que ya fueron realizadas en los ensayos previos. Si se puede decir a la vista de los resultados que existe una concordancia con los de dichos ensayos.

Para la configuración de vía sobre terraplén, no hay grandes diferencias entre la evolución de dicho coeficiente para los distintos tipos de tren, pero si la hay en cuanto al punto de partida, el tren 102 se ve mucho más afectado en ausencia de barrera que el tren 103.

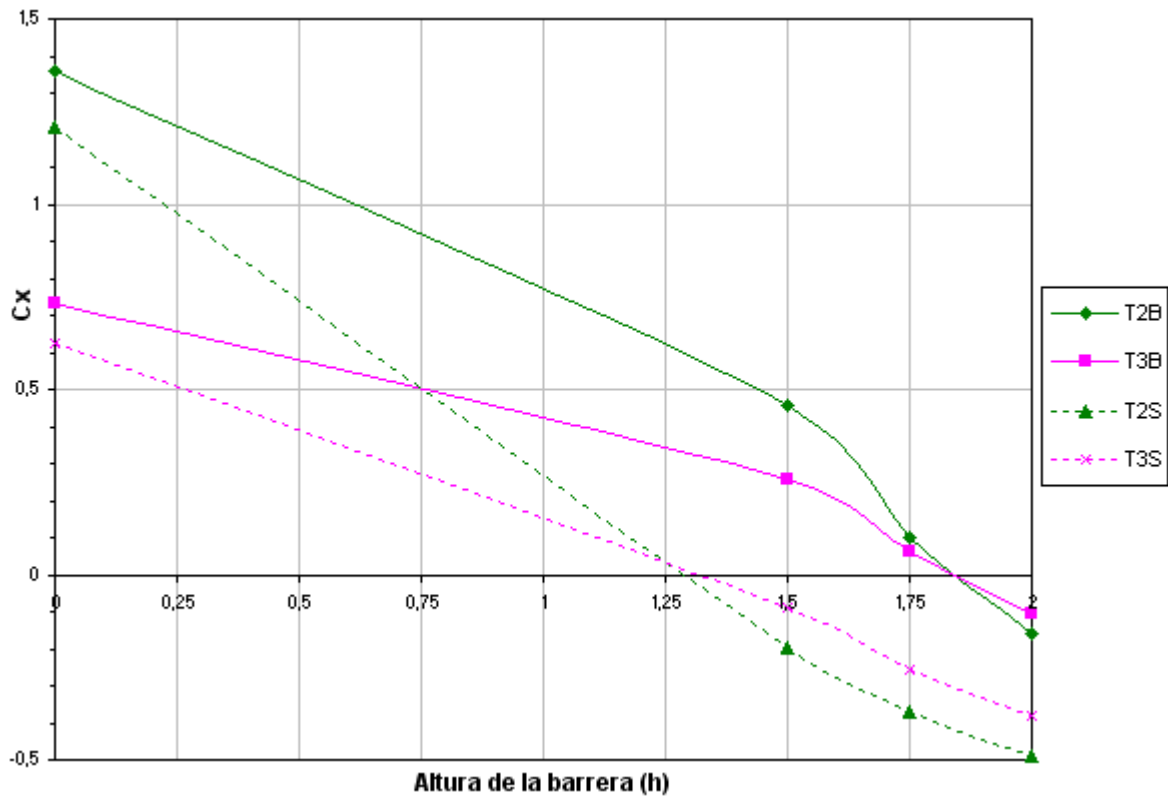


Gráfico 6.15: Variación de C_x en función de la altura de la barrera. Gráfico a partir de los resultados del ensayo 7. En verde los resultados del tren 102 y en rosa los del 103. Con línea de trazo continuo se presentan los de los trenes en vía de barlovento y con discontinua los de vía de sotavento.

La gráfica superior muestra la evolución del coeficiente C_x para los cuatro modelos estudiados. Al igual que sucedía en el caso de vía sobre viaducto, se muestra como para la vía en sotavento el coeficiente es siempre menor, alcanzando valores negativos a partir de una altura de barrera superior a 1,5m.

Se vuelve a demostrar por tanto, ahora en la configuración de vía sobre terraplén, que una altura de barrera que es óptima para el tren situado a barlovento no lo es para el tren de sotavento, que se ve forzado a contraviento cuando la altura de barrera es la adecuada para proteger al tren de la vía de barlovento.

Aunque parece que la altura óptima será un valor entre 1,5 y 1,75 metros, es complejo realizar el análisis de cual es la más eficaz teniendo en cuenta ambas vías, ya que una altura óptima a barlovento es muy perjudicial a sotavento y viceversa. Por eso se va a realizar un análisis estadístico como los realizados en anteriores ensayos con la variable definida en la ecuación 6.2.2.1 para el coeficiente C_x .

Las siguientes tablas muestran estos resultados de la eficacia obtenidos a partir de los valores del ensayo (Tabla D.5). La eficacia da una idea de la mejora o empeoramiento de la colocación de cierta barrera respecto a la misma situación sin barrera.

Eficacia en % de la barrera de 1,5m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	66,221	65,232	65,726
Sotavento	83,734	85,627	84,680
Media	74,977	75,430	75,203
Eficacia en % de la barrera de 1,75m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	92,632	91,710	92,171
Sotavento	69,082	58,943	64,012
Media	80,857	75,327	78,092
Eficacia en % de la barrera de 2m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	88,248	85,540	86,894
Sotavento	59,544	38,645	49,094
Media	73,896	62,092	67,994

Tabla 6.43: Eficacia en tanto por ciento de barreras de 1,5, 1,75 y 2m de altura evaluadas en Cx.

Así reflejados los valores, con los resultados de eficacia, se pueden sacar diferentes conclusiones. La más importante es que salta claramente a la vista que, como sucedía con la configuración de vía en viaducto, es la barrera de 1,75m la que resulta en términos globales más eficaz.

Es la barrera más eficaz para ambos trenes, y con ella se obtienen unos valores considerablemente buenos en la vía de barlovento. No así en la vía de sotavento, pero en un cómputo global, esta barrera de 1,75m da los mejores resultados.

Este análisis es conforme a los datos del coeficiente C_x que representa la afectación lateral, se analiza ahora el coeficiente C_y que marca la sustentación para tener una idea completa de todas las fuerzas que afectan al tren.

La siguiente gráfica muestra la evolución del coeficiente C_y en función de la altura de la barrera para los cuatro casos estudiados.

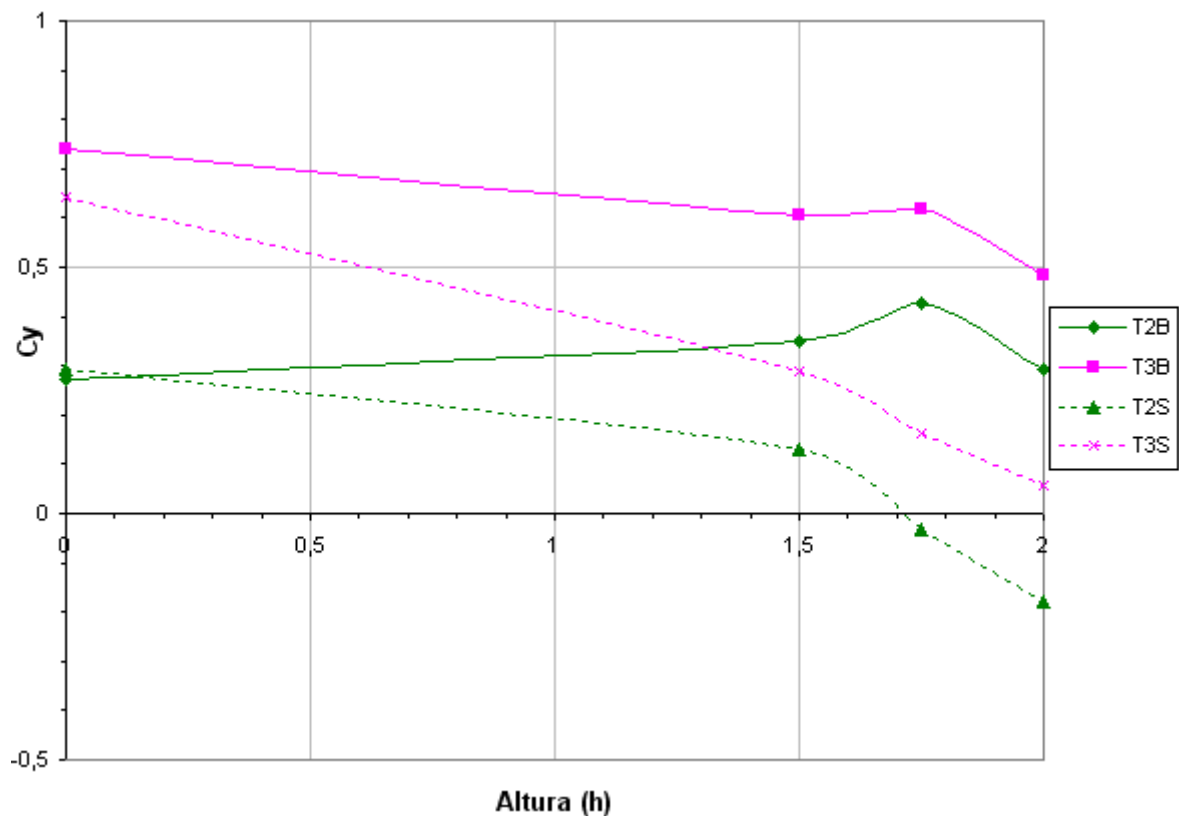


Gráfico 6.16: Variación de C_y en función de la altura de la barrera. Gráfico a partir de los resultados del ensayo 7. En verde los resultados del tren 102 y en rosa los del 103. Con línea de trazo continuo se presentan los de los trenes en vía de barlovento y con discontinua los de vía de sotavento.

Se observa el mismo efecto que para las vías en viaducto, mientras que en los casos de trenes situados en la vía de barlovento la afectación disminuye poco o incluso aumenta algo (como para el caso del tren 102 con barrera de 1,5 y 1,75m), en los trenes de sotavento conforme aumenta la altura de la barrera disminuye la afectación vertical.

Esta observación justifica también la elección de una barrera de mayor altura aunque produzca efectos de fuerza a contraviento en el tren de sotavento, ya que cuanto mayor altura se reduce la sustentación que, aunque en menor grado, beneficia la estabilidad del tren.

Si se realiza el mismo análisis estadístico anterior, pero ahora en base a los resultados del coeficiente C_y , se obtiene la siguiente tabla:

Eficacia en % de la barrera de 1,5m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-28,629	18,177	-5,226
Sotavento	55,043	55,165	55,104
Media	13,207	36,671	24,939
Eficacia en % de la barrera de 1,75m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-56,443	16,763	-19,840
Sotavento	89,376	74,802	82,089
Media	16,466	45,783	31,124
Eficacia en % de la barrera de 2m evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-7,524	34,771	13,624
Sotavento	39,082	91,008	65,045
Media	15,779	62,889	39,334

Tabla 6.44: Eficacia en tanto por ciento de barreras de 1,5, 1,75 y 2m de altura evaluadas en Cx para las vías sobre terraplén.

Como cabía esperar, el hecho de aumentar la altura de barrera hace que la sustentación aumente en casi todos los casos. Esto se debe fundamentalmente a que cuanto más altura de barrera, más espacio queda entre la estela y el techo del tren, y por tanto las líneas de flujo que circulan por el techo tienen menos velocidad, lo que se traduce en una mayor presión y un descenso de la sustentación.

En el único caso en que esto no se cumple es en el del tren 102 a barlovento. Esto se debe a que su forma cuadrada en su borde superior provoca que la estela que golpea en su costado se desprendan hacia arriba en vez de rozar su techo.

Por lo tanto se concluye que el aumento en la altura de la barrera beneficia la sustentación del tren en términos globales y por tanto se puede decir que mejora la situación de partida hacia unos resultados más estables.

6.4.1.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 7.

Teniendo en cuenta tanto los resultados de Cx como los de Cy, se puede concluir a partir del análisis anterior, que para el caso de infraestructura de terraplén los resultados no son muy diferentes en este aspecto a los de vía en viaducto, la barrera más eficaz de las denominadas en este proyecto como tipo A, es también la de 1,75m de altura.

Ahora bien, para el caso de vía en terraplén la diferencia en términos de C_x no es tan acusada entre la barrera de 1,5m y la de 1,75m, ambas son bastante adecuadas, y esta diferencia es de tan solo 3 puntos porcentuales.

Por tanto es posible que la barrera óptima para proteger una vía en terraplén sea algo menor de 1,75m, pero en cualquier caso, el óptimo se sitúa en un valor muy cercano a este, y no merece la pena seguir ensayando para obtener una mayor precisión.

También se ha de tener en cuenta que cuanto más altura de barrera, menor sustentación, y por tanto esto reafirma la decisión de elegir como barrera óptima la de 1,75m en detrimento de cualquier otra de altura centímetros menor.

No está de más volver a aclarar como se hizo para los viaductos, que se ha buscado una solución de compromiso entre las diferentes condiciones que definen el problema planteado de protección de una determinada línea de alta velocidad española, y que cabe la posibilidad de que para otras líneas con otro material rodante y otras características viarias, estas conclusiones no sean igualmente validas.

De nuevo se vuelve a poner en relieve con mayor notoriedad en este caso de vías en terraplén, la necesidad de llegar a un compromiso entre las fuerzas en la dirección del viento que afectan al tren de barlovento y las fuerzas que, a causa de la depresión que se forma tras la barrera, fuerzan al tren de sotavento a contraviento.

El desarrollo de los siguientes modelos de barreras de protección lateral deberá ir encaminado a conseguir soluciones que sean capaces de mitigar los efectos de depresión que afectan negativamente al tren situado en la vía de sotavento y a conseguir barreras con porcentajes de eficacia globales mayores que el de la barrera simple de 1,75m de altura.

6.4.2.- ENSAYO 8: OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA DE LA BARRERA AÑADIÉNDOLE DEFLECTORES INCLINADOS Y HUECOS INFERIORES.

De igual forma que se hizo con la configuración de viaducto, se va a optimizar la forma de la barrera, de cara ahora, a proteger al tren que circula por un terraplén.

Se va a hacer mediante el empleo de barreras con aleros, huecos inferiores, y ambas soluciones combinadas. Ahora se tiene la ventaja de que se parte con los resultados de la configuración de vía en viaducto, y por tanto, el número de ensayos a realizar será probablemente menor.

6.4.2.1. BREVE JUSTIFICACIÓN DEL ENSAYO 8.

El ensayo surge, al igual que el 6, bajo la necesidad de mediante complementos aerodinámicos optimizar la forma de la barrera de cara a proteger a los trenes de alta velocidad del viento cruzado.

La barrera simple alcanza una eficacia cercana al 80%, pero como se vio con los ensayos en viaducto, mediante soluciones aerodinámicas diversas, se puede mejorar esta eficacia y hacer que sea mayor.

Partiendo de los resultados de los ensayos en viaducto, se fija el objetivo en este ensayo de plantear un diseño de barrera que sea lo mejor posible para la configuración de vía en terraplén, teniendo en cuenta sus particularidades.

6.4.2.2. SIMULACIONES QUE CONFORMAN EL ENSAYO 8.

A la hora de plantear las simulaciones que van a conformar este ensayo se ha partido de dos premisas fundamentales.

Primero de los resultados del ensayo 7, que muestran que para proteger un tren en terraplén se necesita una altura de barrera prácticamente igual que para el caso de viaducto, o si acaso de unos centímetros menor.

Segundo, los resultados de las barreras de protección en viaducto fueron lo suficientemente buenos como para suponer que son soluciones extrapolables a la configuración de vía en terraplén, aunque obviamente es posible que se necesiten ciertos retoques para afinar los modelos.

Por tanto, y bajo estas dos premisas, se van a ensayar en principio las mismas tres soluciones que dieron buenos resultados anteriormente:

- a) Barreras con aleros superiores.
- b) Barreras con huecos inferiores.
- c) Barreras que combinen ambas soluciones, es decir, con alero superior y hueco inferior.

Los valores y parámetros que definen estas barreras están en el apartado 6.3.2.2, así como su nomenclatura que también se empleará en este apartado.

De igual forma el estudio se va a dividir en estas tres medidas, aunque como ya se dispone de unos resultados, el avance será más rápido, partiendo de los óptimos obtenidos para la configuración de vía en viaducto. No está de más recordar cuales fueron estos óptimos que marcan los puntos de partida de este nuevo análisis:

- En cuanto a las barreras con alero se consiguieron buenos resultados con la barrera de 1,5m de altura total con alero orientado hacia fuera de la vía, en la nomenclatura la 1,5BP.
- En cuanto a las barreras con hueco inferior, los mejores resultados se lograban con barreras de 2m de altura total y 20cm de altura de hueco. Estos resultados ya eran prácticamente perfectos, con una efectividad global del 94,5% en lo que a afectación lateral se refiere.
- Por último se obtuvo una efectividad en C_x un punto superior a la anterior con una barrera de 2m de altura total, alero orientado hacia fuera y hueco inferior de 20cm, que además conseguía los mejores resultados de sustentación hasta ahora logrados.

Estas tres barreras serán el punto de partida de este nuevo análisis, pero teniendo en cuenta las particularidades de la configuración de vía en terraplén es posible que sean necesarios algunos retoques para conseguir los mejores resultados posibles.

6.4.2.3. REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 8.

Se va a comenzar analizando y representando primero los resultados de análisis de la solución de barrera con aleros, a continuación las barreras con huecos inferiores y por último una combinación de ambas soluciones.

Todos los resultados de las diferentes simulaciones que conforman este ensayo se encuentran en el anexo D, en la tabla D.6.

a) Barreras con aleros.

En base a los resultados de los ensayos anteriores, no hay grandes diferencias entre viaducto y terraplén, aunque si pequeños matices. Esto permite que se obvie el estudio de barreras que dieron pésimos resultados en viaducto, como es el caso de las barreras con alero orientado hacia el interior de las vías.

El primer ensayo que se plantea es por tanto el de la solución antes comentada de la barrera con alero de 1,5m de altura (1,5BP) que en viaducto resulto ser una solución aceptablemente buena.

Estos resultados se muestran en la siguiente tabla junto con los de las simulaciones sin barrera y con barrera de 1,75m de altura para comparar (ambos coloreados en gris). Siguiendo la nomenclatura prefijada; a la izquierda se representan los resultados en la vía de barlovento, a la derecha los de sotavento, y los superiores son los del tren 102 y los inferiores los del tren 103:

T2B			T2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,357	0,272	0A0	1,206	0,293
1,75A0	0,100	0,425	1,75A0	-0,373	-0,031
1,5BP	-0,039	0,480	1,5BP	-0,301	0,052
T3B			T3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,734	0,742	0A0	0,625	0,643
1,75A0	0,061	0,617	1,75A0	-0,256	0,162
1,5BP	0,047	0,510	1,5BP	-0,134	0,238

Tabla 6.45: Resultados de los modelos simulados con barreras de 1,5m de altura y alero orientado hacia el exterior de la vía, comparados con los de las simulaciones sin barrera y con barrera de 1,75m de altura.

Estos datos ya muestran algunos aspectos destacables de las simulaciones con estas barreras sobre la situación de vía en terraplén:

La barrera con alero de 1,5m de altura es, en términos de afectación lateral, mejor solución que la barrera de 1,75m simple, ya que a la vez es capaz de mejorar los resultados del tren de barlovento y reducir el efecto vacío en la vía de sotavento, resultados que se hacen más notables para el tren 103.

En los siguientes mapas de vectores de velocidad se puede apreciar como la barrera con alero resulta mejor solución que la barrera de 1,75m simple, sobre todo para el tren 103 cuando se sitúa en la vía de sotavento.

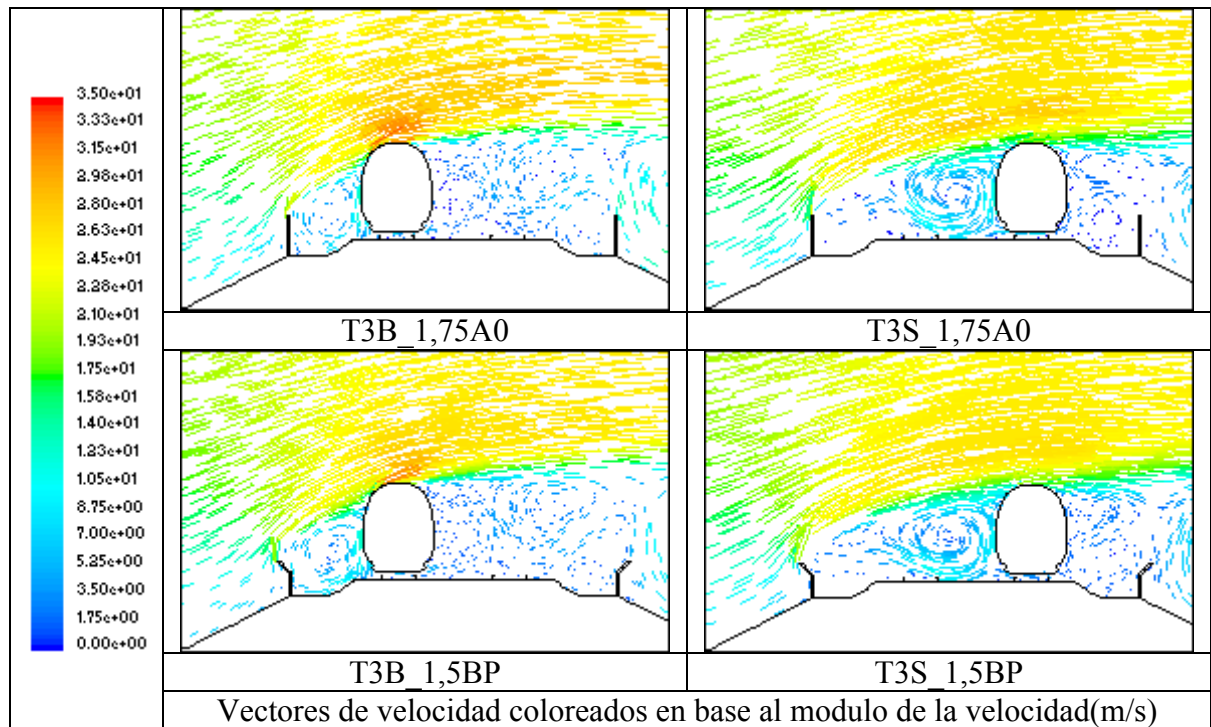


Tabla 6.46: Mapas vectores de velocidad coloreados en base al modulo de la velocidad de modelos simulados con el tren 103 para comparar barreras con alero orientado hacia fuera de 1,5m de altura total (imágenes inferiores) y barreras simples de 1,75m (imágenes superiores).

Estos mapas son muy gráficos para explicar lo que sucede, la barrera de 1,75m de altura levanta menos la estela que la que tiene alero, mejorando la afectación lateral en el tren de barlovento. Además la forma de la barrera con alero hace que el remolino se forme más alejado de la vía de sotavento, haciendo que la depresión que afecta al tren que circula por ella sea menor.

Como contrapartida decir que esta barrera no consigue una mejora sustancial de la sustentación, sobre todo en el tren 102 a barlovento, donde consigue que empeore, lo que tampoco es muy destacable ya que el 102 es un tren más pesado que el 103.

Al igual que antes, se hace necesario un estudio en base a la eficacia para determinar de forma global las fortalezas y defectos de esta barrera con alero. Para ello se comparará con los resultados de eficacia de la barrera de 1,75m simple.

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	92,632	91,710	92,171
Sotavento	69,082	58,943	64,012
Media	80,857	75,327	78,092
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	97,121	93,553	95,337
Sotavento	75,029	78,476	76,752
Media	86,075	86,014	86,044

Tabla 6.47: Comparación en términos de eficacia medida en Cx, entre la barrera simple de 1,75m de altura, la barrera con alero de 1,5m y la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

La misma tabla realizada en base al coeficiente Cy que representa la afectación vertical o sustentación:

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-56,444	16,763	-19,840
Sotavento	89,376	74,802	82,089
Media	16,466	45,783	31,124
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-76,527	31,290	-22,618
Sotavento	82,185	63,027	72,606
Media	2,829	47,158	24,994

Tabla 6.48: Comparación en términos de eficacia medida en Cy, entre la barrera simple de 1,75m de altura, la barrera con alero de 1,5m y la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

Los resultados evaluados en términos de la eficacia son bastante claros, la barrera con alero mejora en todos los aspectos la afectación lateral si se compara con la barrera de 1,75m de altura. La sustentación no es excesivamente buena, lo que es un punto débil de esta barrera con alero.

Los resultados indican que quizás sería conveniente sacrificar un poco de protección en la vía de barlovento para mejorar los resultados en la de sotavento. Esto se consigue con una barrera algo más baja. Por tanto se plantea un estudio similar con una barrera de menor altura, pero igualmente con alero. La nueva barrera a estudiar es de 1,25m de altura, por tanto según la nomenclatura la 1,25BP.

Tren 102 en vía de Barlovento					Tren 102 en vía de Sotavento				
Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)	Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)
0A0	1,36	0,27			0A0	1,21	0,29		
1,25BP	0,24	0,45	82,42	-63,63	1,25BP	-0,16	0,21	86,60	27,13
1,5BP	-0,04	0,48	97,12	-76,53	1,5BP	-0,30	0,05	75,03	82,19
Tren 103 en vía de Barlovento					Tren 103 en vía de Sotavento				
Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)	Ensayo	Cx	Cy	Efic. Cx(%)	Efic. Cy(%)
0A0	0,73	0,74			0A0	0,62	0,64		
1,25BP	0,20	0,60	73,01	18,69	1,25BP	0,02	0,31	97,48	51,21
1,5BP	0,05	0,51	93,55	31,29	1,5BP	-0,13	0,24	78,48	63,03

Tabla 6.49: Tabla de coeficientes y su eficacia para comparar los modelos de barrera con alero de 1,25m y 1,5m de altura.

Se consigue una mejora en el tren situado en la vía de sotavento, pero a costa de empeorar los esfuerzos sobre el tren situado en la vía de sotavento y de aumentar la sustentación, es decir, lo que era previsible.

De nuevo es necesario el análisis en base a la eficacia para evaluar de forma global si esta nueva altura de la barrera con alero mejora o empeora a la anterior.

Eficacia en % de la barrera de 1,25BP evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	82,423	73,011	77,717
Sotavento	86,599	97,476	92,037
Media	84,511	85,243	84,877
Eficacia en % de la barrera de 1,5BP evaluada en términos de Cx			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	97,121	93,553	95,337
Sotavento	75,029	78,476	76,752
Media	86,075	86,014	86,044

Tabla 6.50: Comparación en términos de eficacia medida en Cx, entre las barreras con alero de 1,25 y 1,5m de altura total.

Como muestran los resultados superiores, la barrera con alero de 1,5m de altura total es algo más eficaz en términos globales. Las diferencias no son muy grandes, prácticamente lo que una mejora en la vía de barlovento es lo que la otra empeora en sotavento y viceversa.

Si hubiera de elegirse una solución no se podría evaluar solo en términos de estos valores, ya que apenas existen diferencias, pero teniendo en cuenta que

la sustentación disminuye conforme aumenta la altura de la barrera, es obvio que la barrera globalmente más eficaz es la de 1,5m de altura.

Seguir experimentando con diferentes alturas de barrera carece de sentido, ya que la barrera de 1,5m de altura tiene poco margen de mejora en lo que respecta a la afectación lateral sobre el tren de barlovento, aumentar esta altura de barrera solo producirá peores resultados en el tren de sotavento, y disminuirla ya se ha demostrado que tampoco mejora los resultados.

Por tanto se da por finalizado este estudio, proponiendo la barrera de 1,5m de altura como la que mejores resultados ofrece, con un índice de eficacia global evaluado en términos de afectación lateral del 86%.

b) Barreras con huecos inferiores.

Igual que se ha hecho en el caso anterior, para el desarrollo de este punto se vuelve a partir de la barrera que mejores resultados dio en el caso de viaducto, y a partir de ella se comenzará el estudio en terraplén y se propondrán mejoras al diseño si fuesen necesarias.

Por tanto las primeras simulaciones se realizan con la barrera de 2m de altura total y hueco de 20cm, que en los modelos en terraplén obtiene los siguientes resultados, comparados como antes con la situación sin barrera y con barrera simple de 1,75m de altura.

T2B			T2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,357	0,272	0A0	1,206	0,293
1,75A0	0,100	0,425	1,75A0	-0,373	-0,031
2C0,2	0,049	0,442	2C0,2	-0,160	0,054
T3B			T3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,734	0,742	0A0	0,625	0,643
1,75A0	0,061	0,617	1,75A0	-0,256	0,162
2C0,2	0,181	0,423	2C0,2	-0,101	0,180

Tabla 6.51: Resultados de los modelos simulados con barrera de 2m de altura total y hueco inferior de 20cm comparados con los de las simulaciones sin barrera y con barrera simple de 1,75m de altura.

Los datos muestran que la barrera con hueco inferior de 20cm, mejora siempre la afectación sobre el tren de sotavento, ya que al igual que pasaba en viaducto, el hueco reduce la depresión que se forma entre barrera y tren.

Pero por otro lado, el introducir un hueco empeora la afectación en la vía de barlovento, empeorando los valores de barreras mucho más bajas, como la estudiada anteriormente con alero, o la barrera de 1,75m de altura.

En términos de C_y , es claramente una buena solución, porque iguala o mejora los resultados anteriores, ya que se sigue manteniendo que a mayor altura de barrera menor sustentación.

Al igual que antes, se hace necesario un estudio en base a la eficacia para asegurar de forma global cuales son las mejores soluciones, ya que otra vez se produce el juego de intereses cruzados entre la protección del tren de barlovento y la del tren de sotavento.

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	92,632	91,710	92,171
Sotavento	69,082	58,943	64,012
Media	80,857	75,327	78,092
Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	96,355	75,272	85,814
Sotavento	86,748	83,819	85,284
Media	91,552	79,546	85,549

Tabla 6.52: Comparación en términos de eficacia medida en C_x , entre la barrera simple de 1,75m de altura, con la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

Los resultados son bastante claros, la barrera con hueco inferior mejora en casi todos los aspectos a la barrera de 1,75m de altura total, y obtiene unos valores de eficacia global muy superiores.

Eficacia en % de la barrera de 1,75A0 evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-56,444	16,763	-19,840
Sotavento	89,376	74,802	82,089
Media	16,466	45,783	31,124
Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-62,517	42,968	-9,775
Sotavento	81,492	72,028	76,760
Media	9,487	57,498	33,493

Tabla 6.53: Comparación en términos de eficacia medida en C_y , entre la barrera simple de 1,75m de altura con la barrera con hueco inferior de 0,2m y 2m de altura total.

Los resultados de C_y también son en términos globales mejores, por tanto la barrera con hueco inferior, es también mejor solución que la simple de 1,75m de altura.

Esta misma barrera daba unos resultados excelentes en viaducto con una eficacia en C_x del 94.5%, mientras que los resultados en terraplén son casi 10 puntos inferiores. Esta gran diferencia se debe sobre todo a que en la situación de terraplén no se consiguen buenos resultados para el tren 103 a barlovento.

Una forma de mejorar los de esta barrera es aumentar la altura total, pero esto empeoraría los esfuerzos sobre los trenes de sotavento. Para mitigar este efecto negativo se puede probar a ensayar con unas barreras un poco más altas y con un hueco inferior algo mayor.

Se propone, con el objetivo de optimizar los resultados de las barreras de 2 m con 20 cm de hueco, ensayar una barrera de 2,2m y 25cm de hueco (2,2C0,25 en la nomenclatura). Los resultados de esta nueva solución se comparan en la siguiente tabla con los de la barrera de 2m con 20cm de hueco.

T2B			T2S		
Tipo de barrera	C_x	C_y	Tipo de barrera	C_x	C_y
0A0	1,357	0,272	0A0	1,206	0,293
2C0,2	0,049	0,442	2C0,2	-0,160	0,054
2,2C0,25	-0,037	0,420	2,2C0,25	-0,120	-0,110
T3B			T3S		
Tipo de barrera	C_x	C_y	Tipo de barrera	C_x	C_y
0A0	0,734	0,742	0A0	0,625	0,643
2C0,2	0,181	0,423	2C0,2	-0,101	0,180
2,2C0,25	0,079	0,377	2,2C0,25	-0,165	0,092

Tabla 6.54: Resultados de los modelos simulados con barrera de 2,2m de altura total y hueco inferior de 25cm comparados con los de las simulaciones sin barrera y con barrera de 2m de altura y hueco inferior de 20cm.

La nueva barrera mejora notablemente la afectación sobre el tren 103 a barlovento, que era la situación que se buscaba mejorar, tan solo empeorando levemente la situación a sotavento del mismo tren.

La mejora en el tren 103 a barlovento se produce porque al ser un tren más alto, necesita de una mayor altura de barrera para conseguir bajos valores del coeficiente que marca la afectación lateral, y los 20cm de la nueva son suficientes para hacer que los valores de C_x sean casi cero, lo que indica que el tren se encuentra completamente protegido.

Por otro lado la altura del hueco se muestra un poco insuficiente para reducir el efecto vacío que se produce en el resto de situaciones, pero como se ha estudiado ya, si se aumenta demasiado la altura del hueco también se reduce la efectividad de la barrera.

A pesar de ello, el hecho de que en tres de las cuatro situaciones se registren valores de C_x negativos es sinónimo de que la depresión es elevada, y por ello se va plantea un hueco algo mayor.

Se va a ensayar con una barrera de igual altura respecto del suelo, 2,2m, pero con un hueco algo superior de, en este caso, 30cm (2,2C0,3 en la nomenclatura).

Los resultados se exponen en la siguiente tabla, y para poder compararlos se presentan junto con los de la solución anterior, la de la barrera de 2,2m y 25cm de hueco.

T2B			T2S		
Tipo de barrera	C_x	C_y	Tipo de barrera	C_x	C_y
2,2C0,25	-0,037	0,420	2,2C0,25	-0,120	-0,110
2,2C0,30	0,047	0,440	2,2C0,30	-0,064	0,136
T3B			T3S		
Tipo de barrera	C_x	C_y	Tipo de barrera	C_x	C_y
2,2C0,25	0,079	0,377	2,2C0,25	-0,165	0,092
2,2C0,30	0,140	0,398	2,2C0,30	-0,098	0,166

Tabla 6.55: Resultados de los modelos simulados con barrera de 2,2m de altura total y hueco inferior de 25cm y 30cm.

Como cabría esperar, los 5cm más de hueco hacen que el efecto vacío que provoca esfuerzos negativos prácticamente desaparece en todos los casos. Como contrapartida, el tren 103 a barlovento se vuelve a producir un empeoramiento respecto a los valores de afectación anteriores.

Seguir aumentando el hueco inferior sin aumentar la altura de la barrera sería contraproducente, ya que hay muy poco margen de mejora de las condiciones a sotavento, y lo que se conseguiría sería empeorar las condiciones en la vía de barlovento.

Como ninguna de las tres medidas de barreras con hueco inferior logra mejorar los resultados en todas las situaciones posibles, se hace necesario de nuevo un análisis de la eficacia en tanto por ciento que permita sacar una medida

de la mejora global que producen cada una de las tres barreras. La siguiente tabla compara en términos de C_x estas tres barreras.

Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	96,355	75,272	85,814
Sotavento	86,748	83,819	85,284
Media	91,552	79,546	85,549
Eficacia en % de la barrera de 2,2C0,25 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	97,276	89,264	93,270
Sotavento	90,031	73,565	81,798
Media	93,653	81,415	87,534
Eficacia en % de la barrera de 2,2C0,3 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	96,561	80,921	88,741
Sotavento	94,694	84,312	89,503
Media	95,628	82,617	89,122

Tabla 6.56: Comparación en términos de eficacia medida en C_x , entre la barrera simple de 2m de altura y hueco de 20cm, la barrera de 2m de altura y hueco de 25cm y la barrera de 2,2m de altura y 30cm de hueco.

Con esta tabla se pueden comparar las tres alternativas propuestas y evaluar las diferencias entre ellas en términos de C_x .

- La situación de barrera de 2m de altura con hueco de 20cm, logra un equilibrio casi perfecto entre los esfuerzos que sufre el tren de barlovento y los del de sotavento, pero no es una solución óptima ya que los valores son claramente mejorables en ambas situaciones.
- Al aumentar a altura de la barrera en 20cm y la del hueco en 5cm, se consigue un desequilibrio entre el tren de barlovento y el de sotavento. El primero se encuentra incluso sobreprotegido por esta barrera de mayor altura, y el hueco resulta insuficiente para lograr unos resultados óptimos en la vía de sotavento.
- Por último, la solución de mantener esta altura aumentando el hueco en 5cm, es a la luz de los datos, la que mayor eficacia proporciona. Además es una barrera que logra equilibrar las fuerzas en sotavento y barlovento, con valores de eficacia muy semejantes en ambas situaciones.

Por lo tanto en términos de afectación lateral, la solución de una barrera de 2,2m y 30 cm de hueco inferior es la óptima de las tres estudiadas en este punto,

porque logra el índice de efectividad global más alto, y sobre todo porque logra una práctica igualdad entre fuerzas sobre el tren de barlovento y sobre el de sotavento.

Si se realiza idéntica comparación con los valores de C_y que marcan la sustentación:

Eficacia en % de la barrera de 2C0,2 evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-62,517	42,968	-9,775
Sotavento	81,492	72,028	76,760
Media	9,487	57,498	33,493
Eficacia en % de la barrera de 2,2C0,25 evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-54,739	49,187	-2,776
Sotavento	62,542	85,649	74,095
Media	3,901	67,418	35,660
Eficacia en % de la barrera de 2,2C0,3 evaluada en términos de C_y			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-61,950	46,360	-7,795
Sotavento	53,700	74,201	63,951
Media	-4,125	60,280	28,078

Tabla 6.57: Comparación en términos de eficacia medida en C_y , entre la barrera simple de 2m de altura y hueco de 20cm, la barrera de 2m de altura y hueco de 25cm y la barrera de 2,2m de altura y 30cm de hueco.

Los mejores valores de C_y se dan para la barrera de menor hueco inferior, sobre todo porque mejora la sustentación del tren 102. La diferencia es importante aunque la de altura de hueco sea solo de 5cm.

De todas formas, como ya se ha comentado más veces, hay que poner en relieve los resultados de C_y , si son buenos tanto mejor, pero no son los valores que realmente hay que tener en cuenta, la sustentación es tan solo un efecto secundario que si se reduce mejor.

Con los datos de ambos coeficientes en la mano, es difícil decantarse por una de las dos últimas medidas estudiadas, si parece claro que la mejor solución será una barrera de 2,2m de altura total.

En cuanto a la altura del hueco inferior, tanto la solución de 25cm como la de 30cm tienen virtudes y defectos, un hueco algo mayor mejora en 4 puntos la eficacia medida en términos de C_x , pero empeora en 7 puntos la sustentación.

c) Barreras con alero y hueco inferior.

Por último, y al igual que se hizo con la configuración de vía en viaducto, se van a ensayar barreras que combinen las dos soluciones estudiadas, los aleros y los huecos inferiores, en busca de una solución que logre mejorar a las anteriores.

El punto de partida de este estudio es la barrera con alero de 2m de altura y hueco inferior de 20cm que da resultados óptimos en la configuración de vía sobre viaducto.

Se ha demostrado que la disposición de un alero orientado hacia el exterior tiene efectos semejantes a aumentar la altura de la barrera. Teniendo esto en cuenta, y en vista de los resultados de las simulaciones de modelos con barreras con huecos inferiores, también se cree conveniente el estudio de una barrera de la misma altura pero con hueco inferior algo mayor.

Por tanto se han simulado los cuatro escenarios con barreras con alero de 2m de altura total, con dos alturas de hueco inferior, 20cm y 25cm. La siguiente tabla muestra los resultados de estos modelos.

T2B			T2S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	1,357	0,272	0A0	1,206	0,293
2D0,2	-0,125	0,347	2D0,2	-0,201	-0,006
2D0,25	-0,068	0,368	2D0,25	-0,122	0,044
T3B			T3S		
Tipo de barrera	Cx	Cy	Tipo de barrera	Cx	Cy
0A0	0,734	0,742	0A0	0,625	0,643
2D0,2	0,020	0,341	2D0,2	-0,173	0,134
2D0,25	0,097	0,372	2D0,25	0,040	0,151

Tabla 6.58: Resultados de los modelos simulados con barreras con alero de 2m de altura total y altura de hueco de 20cm y 25cm.

Los coeficientes, tanto de C_x como de C_y , muestran que la solución de alero con hueco inferior consigue en términos globales buenos resultados.

La barrera con hueco de 20cm produce demasiado efecto vacío en la vía de sotavento, e incluso en la vía de barlovento como muestran que los valores de C_x para el tren 102 a barlovento sean negativos.

El hacer el hueco inferior 5cm más grande es una solución perfecta, ya que sin perder mucha efectividad en la protección del tren de barlovento, se consigue

mejorar ostensiblemente los resultados para el tren de sotavento, reduciendo la depresión que lo fuerza a contraviento.

Estudiar otros modelos de barrera, algo más altos y con el hueco inferior mayor conduciría al mismo camino que en el anterior ensayo, se conseguirían mejoras de unos pocos puntos en C_x y empeoramientos mayores en C_y .

A la vista de los resultados de la anterior tabla se puede afirmar que la barrera con alero superior y hueco inferior de 25cm es mejor que la que tiene idénticas condiciones y hueco de 20cm, pero de nuevo se vuelve a recurrir al estudio de eficacia para comparar en términos globales ambas barreras, y a la vez poder comparar con las soluciones antes propuestas, de barrera simple, barrera con alero y barrera con hueco inferior.

Eficacia en % de la barrera de 2D0,2 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	90,820	97,317	94,069
Sotavento	83,380	72,278	77,829
Media	87,100	84,798	85,949
Eficacia en % de la barrera de 2D0,25 evaluada en términos de C_x			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	94,965	86,803	90,884
Sotavento	89,855	93,615	91,735
Media	92,410	90,209	91,309

Tabla 6.59: Comparación en términos de eficacia medida en C_x , entre la barrera con alero de 2m de altura y hueco de 20cm y la barrera, también con alero, de 2m de altura y hueco de 25cm.

En términos de C_x , que marca la afectación lateral, los resultados de la barrera con el hueco de 25cm son muy buenos, se consigue un porcentaje de eficacia adecuado, y superiores a los obtenidos hasta ahora con otras soluciones.

Además se puede decir que es una solución equilibrada, ya que los valores de eficacia son muy semejantes en ambos trenes y en ambas situaciones, barlovento y sotavento.

Si se evalúan los resultados respecto de la sustentación con una tabla semejante:

Eficacia en % de la barrera de 2D0,2 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-27,573	53,960	13,193
Sotavento	97,912	79,220	88,566
Media	35,170	66,590	50,880
Eficacia en % de la barrera de 2D0,25 evaluada en términos de Cy			
	Tren 102	Tren 103	Media
Barlovento	-35,360	49,786	7,213
Sotavento	84,814	76,510	80,662
Media	24,727	63,148	43,937

Tabla 6.60: Comparación en términos de eficacia medida en Cy, entre la barrera con alero de 2m de altura y hueco de 20cm y la barrera, también con alero, de 2m de altura y hueco de 25cm.

Las principales diferencias entre una y otra barrera se producen en el tren 102, que es el más pesado, y por tanto en el que menos importancia tienen las posibles diferencias.

Resumiendo, en el caso de barreras con alero y hueco inferior el análisis si permite destacar una medida sobre las demás, la barrera de 2m de altura con alero y hueco de 25cm es la que mejores resultados presenta a nivel global.

6.4.2.4. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO 8.

Este ensayo ha resultado más complejo de lo que se esperaba, se han realizado más análisis que para la configuración de vía en viaducto, y aun así los resultados que se han obtenido, aun siendo buenos, no llegan a los niveles de eficacia logrados para viaducto.

La primera solución que se ha probado ha sido la de barreras con alero. La barrera con alero de 1,5m de altura resulta ser mejor solución que la barrera de 1,75m simple, ya que a la vez es capaz de mejorar la afectación lateral del tren de barlovento y reducir el efecto vacío en la vía de sotavento.

La protección en la vía de barlovento era incluso algo elevada y se ensayo una barrera más baja de 1,25m, pero los resultados fueron peores, ya que no conseguían una protección adecuada y reducían ostensiblemente la sustentación.

El análisis demuestra que esta primera solución del alero es eficaz, constituye una mejora aerodinámica de importancia para el caso de infraestructuras de terraplén, y permite con menor altura de barrera conseguir protecciones más eficaces que las que aportan las barreras simples de mayor altura.

La siguiente solución es la de barreras con huecos inferiores. Al igual que en viaducto, el hueco inferior vuelve a ser una solución para mitigar el efecto vacío en la vía de sotavento. Se parte de la barrera de 2m de altura y 20cm de hueco inferior, que no obtiene tan buenos resultados como lo hizo en viaducto, ya que no consigue una protección total en la vía de barlovento.

Por lo que se hace necesario aumentar la altura de la barrera, a la vez que también el hueco para reducir el efecto vacío en la vía de sotavento. Mediante una sucesión de ensayos con sus correspondientes análisis, se llega a dos barreras con buenos resultados, una con un hueco de 25cm y otra de 30cm, y ambas con una altura total de 2,2m.

Se siguió adelante ensayando una solución que combinaba las dos anteriores buscando una optimización mediante el diseño de barreras con alero y hueco inferior. Se partió de la barrera de 2m de altura total y hueco de 20cm. Los datos reflejan que para terraplén esa altura de hueco inferior es claramente insuficiente, ya que aparecen depresiones en sotavento.

Un aumento de la altura del hueco de 5cm mejoraba los resultados de sotavento sin mermar la protección en la vía de barlovento. Esta solución es la que lograba un mejor equilibrio entre fuerzas sobre el tren de una vía y otra.

La solución de barrera de 2m de altura con hueco inferior de 25cm y alero orientado hacia el exterior de la vía consigue hacer que en terraplén el tren se vea sometido a los esfuerzos laterales más bajos de todas las barreras estudiadas.

6.3.5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LAS BARRERAS PARA-VIENTO EN LA CONFIGURACIÓN DE TERRAPLÉN.

El estudio de optimización en la configuración de terraplén no ha conseguido tan buenos resultados como en la configuración de viaducto, a pesar de que han sido necesarias de nuevo 48 simulaciones y se han probado por tanto más diversas soluciones ya que se partía de los resultados en viaducto.

En parte esto se debe a que como se vio en los ensayos previos, la afectación lateral en los trenes que circulan por terraplén es menor que en viaducto.

El primero de los ensayos que componen este estudio, el ensayo 7, no viene sino a ratificar esta afirmación, el tren en terraplén sin protección tiene

coeficientes de afectación lateral menores que en viaducto, principalmente porque el suelo y el balasto ejercen una cierta protección sobre el tren reduciéndolos.

Constantemente se ha empleado la efectividad respecto a la situación sin barrera para medir la bonanza de las medidas propuestas, y por tanto al ser un valor más pequeño es lógico que resulte más difícil conseguir valores de efectividad altos, ya que el margen de mejora es menor.

A parte de esto, las diferencias entre la protección para una estructura de viaducto y para la de terraplén se han hecho palpables, no de manera significativa, pero si a modo de ajustes de unos pocos centímetros en cada una de las soluciones estudiadas.

A modo de resumen se presenta en la siguiente tabla los valores de efectividad global evaluados en términos de C_x y C_y para los modelos de barrera que mejores resultados han dado en este estudio de optimización para vía en terraplén.

Modelo de barrera	Efectividad global en C_x (%)	Efectividad global en C_y (%)
1,75A0	78,092	31,124
1,5BP	86,044	24,994
2,2C0,25	87,534	35,660
2,2C0,3	89,122	28,078
2D0,2	85,949	50,880
2D0,25	91,309	43,937

Tabla 6.61: Valores en tanto por ciento de la eficacia global respecto los modelos sin barrera de los modelos sin barrera que mejores resultados han dado para la protección en terraplén.

Estos resultados muestran, que hay una barrera que destaca sobre el resto, porque además de obtener resultados superiores en términos de C_x , sus resultados de C_y pasan por ser de los mejores que se han obtenido para la configuración de terraplén.

Esta barrera es la última que se estudio de 2m de altura total con alero inclinado hacia el exterior de la vía y hueco inferior de 25cm, como la que se representa en el siguiente esquema acotado.

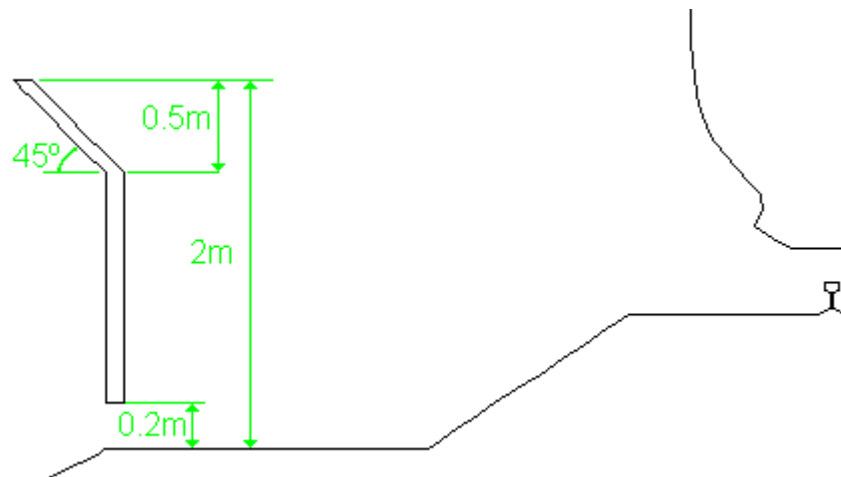


Imagen 6.18: Esquema de la barrera que según los estudios y análisis realizados, da resultados óptimos para la configuración de vía en terraplén.

Además de que es la barrera que consigue el índice de efectividad global en C_x mayor, destaca porque como ya se analizó en las valoraciones del ensayo 8, consigue un buen equilibrio entre la protección del tren en la vía de barlovento y la del tren de la vía de sotavento, haciendo que los coeficientes sean igualmente buenos en ambas situaciones.

Es la que mejor cumple con los objetivos marcados, pero al contrario de lo que sucedía en viaducto, no es una solución que destaque ampliamente sobre las demás. El análisis del ensayo 8 recoge un amplio abanico de opciones que dan buenos resultados con barreras algo más simples y probablemente más baratas y fáciles de instalar, como la barrera de 2,2m con hueco inferior de 25 o 30cm.

También la barrera de 1,5m de altura total con alero orientado hacia el exterior de la vía da buenos resultados en la configuración de terraplén, y a su favor tiene su baja altura.

Pero además se ha efectuado un amplio análisis que puede ser de gran interés si se busca el desarrollo de barreras para otras condiciones de operación, con consideraciones que se encuentran recogidas en los apartados de análisis y valoraciones de los respectivos ensayos 7 y 8.

Se han obtenido a lo largo de las 48 simulaciones que conforman estos dos ensayos en terraplén, una gran cantidad de datos y valoraciones que pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de medidas eficaces en otras condiciones de problema.

6.5. ANÁLISIS TÉCNICOS Y DE COSTES DE LAS MEJORES SOLUCIONES PROPUESTAS.

En este apartado se va a realizar un análisis de las mejores soluciones a modo de barreras para-viento que se han propuesto anteriormente. Se va a hacer desde tres puntos de vista:

- Desde un punto de vista técnico estructural, con una exposición de los esfuerzos, fuerzas y momentos a los que se vería sometida la barrera en un posible montaje en una L.A.V. como las estudiadas.
- Desde un punto de vista económico, con una estimación de los costes de instalación de las barreras que han dado mejores resultados en los análisis posteriores.
- Desde el punto de vista de la viabilidad, para evaluar en términos globales las mejoras que se producirían con la instalación de las barreras y cotejarlas con sus costes estimados.

6.5.1. ESTUDIO ESTRUCTURAL.

Este apartado pretende, aprovechando los datos recopilados en las simulaciones de todos los ensayos realizados, dar una aproximación numérica de las fuerzas y momentos que afectarán a las barreras de protección lateral propuestas.

La Norma Europea EN 1991-1-4 (25) sobre Acciones generales en estructuras provocadas por el viento, proporciona indicaciones para la determinación de las acciones naturales del mismo para el diseño estructural en las obras de edificación e ingeniería civil como puede ser la instalación de las medidas de mitigación que han sido propuestas.

Como ya se ha recogido, los ensayos de este proyecto han sido realizados en base a las condiciones de rugosidad del terreno, e intensidad de la turbulencia marcados por esta misma norma.

Las fuerzas y momentos que actúan como consecuencia de la presión que crea el viento, dependen fundamentalmente de la velocidad con la que sopla y de la forma del objeto que se está estudiando. La siguiente ecuación define la fuerza o momento que actúa sobre un sólido cualquiera a causa del viento:

$$F_b = C_{fb} \times \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2$$

$$M_b = C_{mb} \times \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad (6.5.1.1)$$

Tanto fuerza como momento depende de tres variables:

- La densidad del aire, que a su vez depende de la presión ambiente y de la temperatura.
- El cuadrado de la velocidad básica del viento, parámetro que se calcula siguiendo las indicaciones de la citada norma a partir de las velocidades de ráfaga medidas, de la altura, del tipo de terreno, de la estación del año, etc.
- Por último los coeficientes C_{fb} y C_{mb} . Estos coeficientes depende de la forma de la barrera, y de su área total, teniendo en cuenta por tanto su longitud en la dirección perpendicular al viento. Tienen unidades de m² el primero y m³ el segundo.

Son estos últimos coeficientes los que se van a recoger aquí, y que se han obtenido a partir de los datos de fuerza proporcionados por FLUENT en las simulaciones.

Con los modelos ya planteados, resulta sencillo obviar la figura del tren y calcular mediante simulaciones semejantes a las de los ensayos, las fuerzas y momentos que actúan sobre las barreras. Se van a exponer a continuación los coeficientes de las barreras que han dado mejores resultados en los ensayos anteriores.

Los coeficientes que se recogen se corresponden con los de la situación más desfavorable, es decir, la de la barrera de barlovento. La barrera de sotavento, al estar aguas abajo, está sometida a esfuerzos menores.

Los de momento están calculados respecto al suelo, es decir, lo que sería la base de la barrera en éste (aunque esta tenga un hueco inferior, se ha considerado el suelo donde irían anclado los postes como centro de giro).

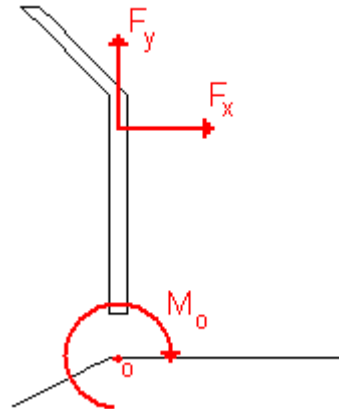


Imagen 6.19: Detalle de las fuerzas que actúan sobre la barrera.

Los coeficientes de fuerza según el eje “x”, el eje “y”, y de momento respecto al punto llamado “o”, se representan en la siguiente tabla para los modelos de barrera que han dado mejores resultados en terraplén y en viaducto. El criterio de signos que se sigue es el definido en la figura superior.

Viaducto/Terraplén	Modelo de barrera	$C_{xb} \text{ (m}^2\text{)}$	$C_{yb} \text{ (m}^2\text{)}$	$C_{mob} \text{ (m}^3\text{)}$
Viaducto	2C0,2	3,51	0	3,62
Viaducto	2D0,2	3,70	0,95	4,35
Terraplén	2,2C0,25	3,24	0	3,68
Terraplén	2D0,25	3,30	0,88	3,96

Tabla 6.62: Coeficientes aerodinámicos de las barreras consideradas como óptimas para terraplén y viaducto

Con estos coeficientes resulta sencillo conocer la fuerza y el momento que actuaría sobre cada barrera en función de la velocidad del viento que se considere, tan solo hay que multiplicar estos valores por la densidad, la velocidad al cuadrado, y dividir entre dos.

Los coeficientes en la dirección “y” de las barreras tipo C son obviamente cero, ya que la barrera es lo suficientemente fina como para no soportar fuerzas en la dirección de este eje.

Reiterar que este apartado no tiene como objetivo realizar un estudio de las fuerzas que actuarían sobre cada tipo de barrera, solo se ha pretendido aprovechar que los modelos estaban contruidos, para simularlos sin tren y obtener los valores de los coeficientes aerodinámicos de las nuevas barreras definidas.

A partir de estos coeficientes aquí recogidos, y empleando las indicaciones de la Norma Europea EN 1991-1-4 se pueden conocer las fuerzas que actuarían sobre las barreras, evaluarlas en condiciones de servicio, e incluso el cálculo de las inestabilidades aeroelásticas en función del material que se elija para la fabricación de las barreras.

6.5.2. ESTUDIO DE COSTES.

Este apartado solo tiene como objetivo crear una idea de los costes posibles de instalación de las barreras. No es por tanto ni mucho menos un presupuesto, sino una aproximación sin excesivo detalle, ya que para obtenerlo habría que hacer un estudio que incluyese las particularidades del terreno, entre otras muchas variables.

Los resultados aquí recogidos están basados en las bases de precios que publican los colegios oficiales de arquitectos e ingenieros, y que se publican libremente en algunas páginas especializadas de Internet (33 y 34). Este apartado solo recoge datos oficiales pero redondeados, porque lo que se busca no es abrumar con cifras sino dar una idea muy aproximada de los costes que tendría la implantación de las medidas propuestas.

No se entrará a valorar las formas de las barreras, y solo se centrará en barreras comerciales que están en el mercado y que se pueden comprar actualmente, por tanto no se evaluarán barreras diseñadas a partir de los resultados de este proyecto para un cometido específico.

Por tanto quedan excluidos de este análisis de costes, aquellos relativos al diseño de las nuevas barreras, es decir, lo que serían fundamentalmente los gastos de desarrollo de este proyecto. Estos costes estarán recogidos en el apartado del presupuesto que se incluye más adelante.

Se va a dividir este apartado en dos puntos, uno relativo al coste del material necesario para la barrera, y otro relativo a los costes de montaje.

Comenzando con los costes de material, cabe decir, que actualmente el mercado ofrece diferentes posibilidades, pantallas opacas como las prefabricadas de hormigón y las de chapa de acero galvanizado, y pantallas transparentes, normalmente de cristal o de metacrilato. Además también las hay mixtas, base de hormigón y parte superior de metacrilato.

Las siguientes imágenes muestran algunos ejemplos de barreras comerciales como las que se pueden encontrar actualmente en nuestras carreteras o líneas de ferrocarril, es decir, soluciones comerciales.



Imagen 6.20: Distintos tipos de barreras comerciales, metálicas, de hormigón, transparentes y mixtas.

Con el fin de dar una idea general se han buscado precios por metro cuadrado de los distintos tipos de materiales. Estos precios incluyen la parte proporcional de uniones, accesorios y postes de refuerzo de acero galvanizado necesarios para su montaje, pero no los costes de dicho montaje.

- Pantalla de 1,5 a 3m de altura, formada por una placa de acero galvanizado de 8mm de espesor: 70€/m²
- Pantalla de 1 a 2m de altura, formada por una placa prefabricada de hormigón: 100€/m²
- Pantalla de 1 a 2m de altura, formada por una placa de metacrilato de 15mm de espesor: 170€/m²
- Pantalla de 2 a 3m de altura, formada por una placa de metacrilato de 15mm de espesor: 185€/m²
- Pantalla de 1,5 a 3m de altura, formada por una placa de cristal estratificado de 15mm de espesor: 200 €/m²

Los resultados de los análisis en detalle permitieron definir unas barreras óptimas tanto para la configuración de vía en viaducto, como para la configuración de vía en terraplén.

Este análisis es solo una aproximación, y como tal, se van a aproximar los costes de la barrera de 2 metros de altura total, con alero orientado hacia el exterior de la vía y hueco inferior de 20cm. Esta era la solución más eficaz en viaducto, y es bastante parecida a la propuesta también para terraplén, aunque como se vio en los análisis existen otras soluciones menos complejas que dan también buenos resultados.

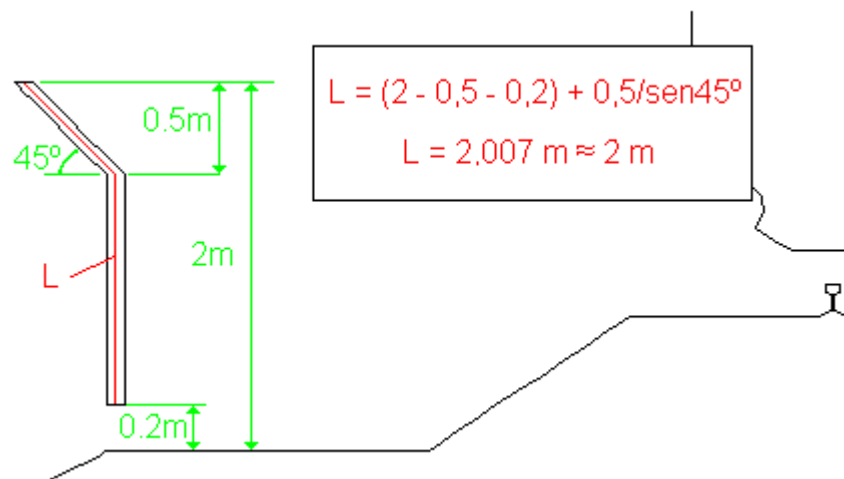


Imagen 6.21: Detalle de la barrera empleada para este análisis, con su longitud bidimensional definida.

La forma de la barrera que se ve en la imagen superior, con alero en la parte superior, y un hueco en la inferior, invita a descartar a priori la solución de hormigón, ya que sería difícil acoplarla a la forma exigida, por lo que se descarta dentro de este análisis de costes.

Teniendo en cuenta que la barrera así definida tiene el equivalente a 2m de alto, es fácil realizar una estimación de los costes que implicaría de material a partir de los precios ya mostrados. Aún así se expone la siguiente tabla con unos precios aproximados por metro lineal de barrera, donde se incluyen los postes, y accesorios necesarios para su montaje.

	Acero galvanizado	Metacrilato de 15mm de espesor.	Cristal estratificado de 15mm de espesor.
Coste del m ² (€/m ²) de barrera.	70	180	200
Coste del m lineal de la barrera estudiada (€/m)	140	370	400

Tabla 6.63: Costes de material estimados para la barrera de 2m de altura con alero y hueco inferior de 20cm. Datos extraídos del C.O.A.A.T.G.

En lo referente a los costes de montaje de todas estas barreras son muy parecidos y se pueden considerar costes fijos. A continuación se expone, en una tabla, una estimación de cuales pueden ser estos costes de montaje en condiciones semejantes a las del problema y según los datos del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos técnicos de Guadalajara.

Unidad monetaria.	Definición	Precio	Cantidad aproximada	Precio en € por m ² instalado de barrera.
h	Oficial 1a	16,79	0,115	1,93085
h	Peón	15	0,345	5,175
h	Camión grúa de 3 t	43,58	0,115	5,0117
%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	7,10585	0,025	0,17765
Total por m² de barrera instalada				12,3

Tabla 6.64: Costes de la instalación de las barreras en situaciones parecidas a las del problema.

De forma general, si se suman estos precios fijos a los precios de las barreras dependiendo del material elegido, y se multiplican por la longitud que se quiere instalar se obtendría los costes totales a falta de añadir aquellos relativos a la parte proporcional del trabajo de diseño de la forma de la barrera.

La siguiente tabla muestra dos ejemplos de costes para la barrera comentada de 2m de altura, con acero y con metacrilato como materiales elegidos, considerando una longitud de 20m de barrera para proteger un tramo de 10m de vía por ambos lados.

U.M.	Definición	Precio €	Cantidad por m2 instalado	Medición en m2	€/m2
h	Oficial 1a	16,79	0,115	40,00	77,234
h	Peón	15,00	0,345	40,00	207,00
m2	Pantalla de 1,5 a 3m de altura, formada por una placa de acero galvanizado pintado de 8mm de espesor incluso parte proporcional de uniones y accesorios y poste de refuerzo de acero galvanizado cada 3 m	70,00	1,00	40,00	2800,00
h	Camión grúa de 3 t	43,58	0,115	40,00	200,468
%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	7,11	0,025	40,00	7,11
				Total	3.291,8

Tabla 6.65: Ejemplo de costes de instalación de 20m de barrera de 2 de altura de chapa de acero galvanizado.

U.M.	Definición	Precio €	Cantidad por m2 instalado	Medición en m2	€/m2
h	Oficial 1a	16,79	0,115	40,00	77,234
h	Peón	15,00	0,345	40,00	207,00
m2	Pantalla de 2m de altura, formada por una placa de metacrilato de 15mm de espesor incluso parte proporcional de uniones y accesorios y poste de refuerzo de acero galvanizado cada 3m	180,00	1,00	40,00	7.200,00
h	Camión grúa de 3 t	43,58	0,115	40,00	200,468
%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	7,11	0,025	40,00	7,11
				Total	7.691,8

Tabla 6.66: Ejemplo de costes de instalación de 20m de barrera de 2m de altura de metacrilato transparente.

Como se aprecia con estos ejemplos, el coste del material es realmente lo más importante, y por tanto la elección de un material u otro puede condicionar la viabilidad de la instalación de las barreras.

No es objeto de este proyecto realizar un estudio sobre los tipos de material más adecuados, ya que se pretende centrarse únicamente en el diseño, pero aún así, los estudios previos que fueron realizados, y la propia intuición permiten hacer una serie de consideraciones que creo podrían ser tenidas en cuenta a la hora de elegir el material.

La elección del material dependerá de la zona en la que se instale la pantalla, si es en viaducto es recomendable que sea transparente, al menos a la altura de la ventanilla del tren, para que el pasajero pueda observar sin dificultades el paisaje.

En el caso de vía sobre terraplén, también es bastante recomendable que la barrera no quite visibilidad a los pasajeros, sobre todo si su instalación se va a realizar en tramos largos, ya que en algunos ocupantes puede producir sensación de estar encerrado, claustrofobia y mareos.

De nuevo indicar que no es el objeto de este proyecto el discutir el material de las barreras más adecuado, ni justificar o entrar a valorar los gastos de instalación. Pero se ha creído conveniente tratar este tema para estimar de modo muy aproximado los posibles costes de las medidas de mitigación que han sido seleccionadas por sus buenos resultados en los análisis.

Estos valores económicos pretenden orientar al lector sobre los precios de las barreras o parapetos que se proponen como medidas de mitigación del viento lateral, a la vez que sirven como una primera estimación de costes para un posterior análisis de viabilidad de estas medidas propuestas

6.5.3. ESTUDIO DE VIABILIDAD.

En este punto va a realizar un análisis de las medidas de mitigación propuestas a modo de estudio de viabilidad de estas. A lo largo de los análisis y valoraciones de los diferentes ensayos se han obtenido los valores de los coeficientes C_x y C_y que determinaban lo bueno o mala que era cada barrera propuesta.

Estos datos y los del factor de efectividad ponían de relieve las mejoras que estas barreras producían sobre los efectos perjudiciales del tren respecto a la misma situación sin barrera.

Ahora lo que se propone con este estudio, es mediante el uso de las tablas de la Especificación Técnica de Interoperabilidad (24), comparar y analizar el grado de eficacia de las medidas propuestas en función de la velocidad de circulación del tren, es decir, determinar como mejora esta velocidad con el uso de barreras.

Lo que se va a hacer es el desarrollo que está expuesto en el capítulo 3, apartado 3.2.4, que consiste en comparar los valores de viento obtenidos con las limitaciones impuestas por las especificaciones, y de esta manera evaluar la bondad de la barreras.

La ETI recoge en unas tablas (Tablas 3.3.a 3.5 del capítulo 3) los valores de velocidad máxima de circulación en función de la velocidad del viento lateral, del ángulo de incidencia y de la aceleración lateral.

Se va a considerar el caso más restrictivo, el de velocidad del viento característica de referencia para un ángulo de incidencia de 90° considerando un terraplén de 6m de altura.

Velocidad máxima del tren permitida	Velocidad del viento característica de referencia para el caso de terraplén y ángulo de incidencia de 90° (m/s)
120 km/h	34,1
160 km/h	31,3
200 km/h	28,5
250 km/h	25,0
260 km/h	24,5
270 km/h	24,0
280 km/h	23,5
290 km/h	23,0
300 km/h	22,5
310 km/h	22,0
320 km/h	21,5
330 km/h	21,0
340 km/h	20,5
350 km/h	20,0

Tabla 6.67: Velocidades de circulación máximas del tren que fija la Especificación Técnica de Interoperabilidad en función de la velocidad del viento incidente.

Para este estudio se va a considerar un parámetro que ya fue definido en el capítulo 3, el coeficiente adimensional del momento respecto del suelo (ecuación inferior). A partir de los momentos que se obtienen con el programa FLUENT, se puede determinar este coeficiente que permite estimar el momento de vuelco que sufre el tren para cualquier otra velocidad del viento.

$$C_{m_0} = \frac{M_{0v}}{0,5 \cdot \rho \cdot V_{viento}^2} \quad (6.5.3.1)$$

Lo primero que se hace es obtener los coeficientes de momentos de los trenes simulados en escenarios sin barrera, calculando este momento respecto al punto marcado como origen de coordenadas en la siguiente figura:

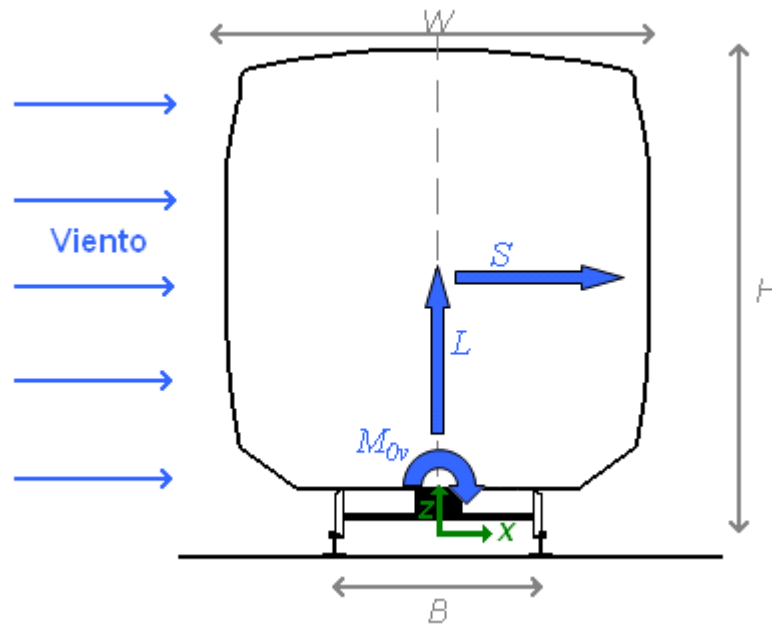


Imagen 6.22: Esquema de la distribución de las fuerzas provocadas por el viento sobre el tren.

Estos coeficientes adimensionales van a permitir comparar una situación con barrera con otra sin barrera. Las barreras que se van a estudiar son las tres que mejores resultados han obtenido, dos en viaducto y una en terraplén:

- En viaducto se van a considerar la barrera 2D0,2, es decir una barrera de 2m de altura, y hueco inferior de 20cm, con alero orientado hacia el exterior de la vía, y la barrera 2C0,2, una barrera de 2m de altura con un hueco inferior de 20cm.
- En terraplén la barrera 2D0,25, una barrera de 2m de altura con alero y hueco inferior de 25cm en este caso.

Con los coeficientes de los momentos sobre el tren protegido por estas cuatro barreras, se calcula el momento que sufriría el tren protegido para una determinada velocidad del viento. Este momento es obvio que es menor que el calculado para un tren sin protección.

$$\begin{aligned}
 M_{ov}(\sin_barrera) &= C_{mo} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{viento}^2 \\
 M_{ov}(con_barrera) &= C_{mob} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{viento}^2 \\
 M_{ov}(\sin_barrera) &> M_{ov}(con_barrera)
 \end{aligned}
 \tag{6.5.3.2}$$

Lo que se a calcular es la velocidad del viento equivalente que correspondería a ese momento en el caso de que el tren no estuviera protegido, es decir, el viento efectivo sobre el tren. La variable V_{equiv} equivale a esta velocidad efectiva, siendo la velocidad real V_{viento} .

$$\left. \begin{aligned} M_{ov}(con_barrera) &= C_{mo} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{equiv}^2 \\ M_{ov}(con_barrera) &= C_{mob} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{viento}^2 \end{aligned} \right\} C_{mo} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{equiv}^2 = C_{mob} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{viento}^2$$

$$\boxed{V_{equiv}^2 = \frac{C_{mob}}{C_{mo}} V_{viento}^2} \quad (6.5.3.3)$$

Teniendo en cuenta este último desarrollo, la siguiente tabla muestra los valores de viento efectivo para unos valores de viento real dados en cada una de las dos barreras planteadas.

Modelo	C_{mob}	C_{mo}	Velocidad real del viento (m/s)			
			25	30	35	40
Viaducto con modelo de barrera 2D0,2			Velocidad equivalente del viento (m/s)			
V2B_2D0,2	0,85	10,18	7,20	8,64	10,08	11,52
V2S_2D0,2	0,37	4,98	6,80	8,16	9,52	10,87
V3B_2D0,2	0,34	8,43	5,05	6,06	7,07	8,08
V3S_2D0,2	0,32	5,46	6,05	7,26	8,47	9,68
Viaducto con modelo de barrera 2C0,2			Velocidad equivalente del viento (m/s)			
V2B_2C0,2	1,18	10,18	8,52	10,22	11,92	13,63
V2S_2C0,2	0,34	4,98	6,55	7,87	9,18	10,49
V3B_2C0,2	0,94	8,43	8,35	10,02	11,69	13,36
V3S_2C0,2	0,34	5,46	6,21	7,46	8,70	9,94
Terraplén con modelo de barrera 2D0,25			Velocidad equivalente del viento (m/s)			
T2B_2D0,25	0,23	7,66	4,36	5,23	6,10	6,97
T2S_2D0,25	0,52	3,74	9,29	11,15	13,01	14,87
T3B_2D0,25	0,69	7,11	7,78	9,34	10,90	12,45
T3S_2D0,25	0,33	3,69	7,46	8,95	10,44	11,93

Tabla 6.68: Viento equivalente al que incidiría sobre el tren protegido por una barrera calculado para diferentes valores de viento real.

Estos resultados no vienen sino a ratificar la eficacia de la barrera, ya que con la peor de las condiciones posibles, un viento de 40m/s, el tren estaría sometido a unos esfuerzos equivalentes a los que produciría un viento de a lo sumo 14.87m/s en el peor de los casos estudiados.

Esto quiere decir que con el empleo de las barreras de protección elegidas, tanto en terraplén, como en viaducto, se conseguiría una protección muy eficaz sobre los trenes, de tal forma que por fuerte que fuese el viento exterior no se verían obligados a reducir la velocidad de circulación siguiendo los valores recomendados por la ETI.

Este estudio de viabilidad debe tomarse tan solo como una aproximación a lo que podrían ser resultados reales. Para confirmar estos valores sería necesario un estudio dinámico del tren, considerando todas sus variables.

Dichas variables, como puede ser el peso por eje exacto, la altura del centro de gravedad, la rigidez de la suspensión, son valores completamente confidenciales de cada empresa y por tanto el estudio dinámico es a día de hoy difícil de realizar con los datos de los que disponemos.

Por esta razón, y ante la imposibilidad actual de realizar un correcto análisis dinámico, se ha optado por valorar mediante los momentos, la eficacia de las mejores medidas de mitigación propuesta.

El resultado es que la instalación de barreras en zonas de fuertes vientos conseguiría, según nuestros cálculos en base a las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad y no en base a estudios dinámicos, reducir la afectación lateral sobre el tren hasta valores tales que este podría circular a su velocidad máxima de circulación (350km/h para los dos trenes estudiados en este proyecto).

Debe tenerse también en cuenta que esta afirmación se hace en base a un estudio bidimensional y estático, es decir, que no se han tenido en cuenta factores tales como la velocidad del tren o la aceleración lateral en caso de curva.

Aún así los resultados dan tanto margen, que se puede afirmar que las barreras propuestas como medidas de mitigación consiguen su objetivo de proteger al tren sin forzarlo a que reduzca su velocidad de circulación, siempre que se considere un tramo recto.

7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.

CAPÍTULO 7: PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.

7.1.- PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN.

Previamente a la planificación y programación de este proyecto de investigación, se realizó una estructura de descomposición del proyecto con una descomposición minuciosa de todos los trabajos que iban a ser necesarios.

En la figura siguiente se expone el diagrama de Gant de la programación del presente proyecto realizada en base a la EDP. En él aparecen todas las tareas y subtareas del proyecto, así como sus respectivas relaciones de dependencia.

El diagrama está organizado por meses aunque el trabajo se dividió en semanas, con sesiones de control por parte del tutor los viernes.

La programación temporal del proyecto se hizo en base a las horas de dedicación de las que se dispondría en cada semana, fijándose este valor en 20 horas de dedicación semanal.

La decisión de empezar el proyecto se tomó a finales de Febrero de 2008, mes en el que se realizó la primera planificación que luego daría lugar a la programación abajo presentada. Se comenzó el proyecto en Marzo del mismo año, con el objetivo de presentarlo en la convocatoria de Abril de 2009, por tanto se fijó como fecha límite el 31 de Marzo de 2009, límite que se ha cumplido.

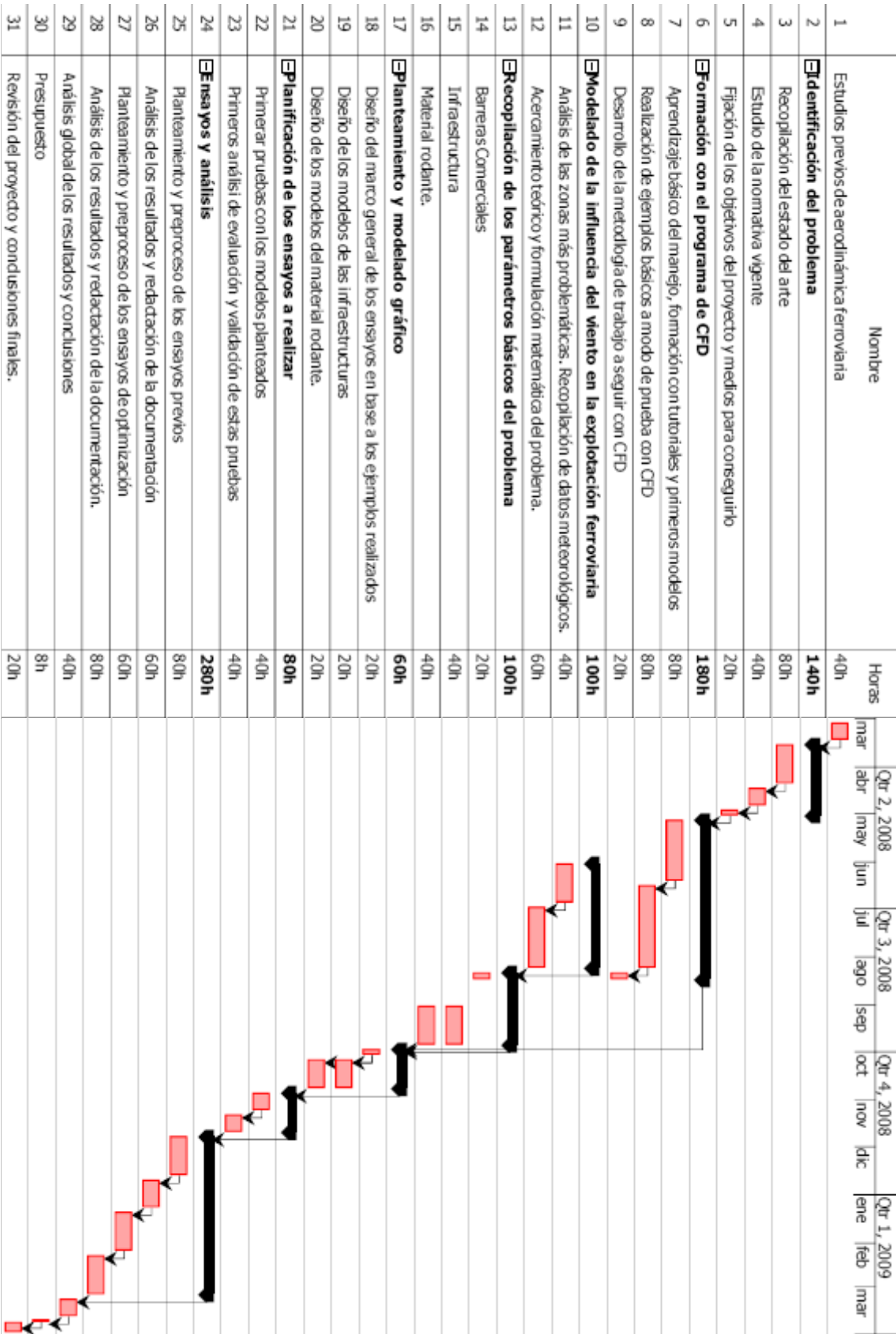


Imagen 7.1: Diagrama de Gant de la programación temporal del proyecto.

En total el proyecto ha tomado un total de 1040 horas, o lo equivalente al trabajo durante 13 meses a razón de 20 horas semanales.

En la siguiente figura se presenta un gráfico que resume el tiempo dedicado (en horas) por el autor del Proyecto para desarrollar cada una de las actividades anteriores.

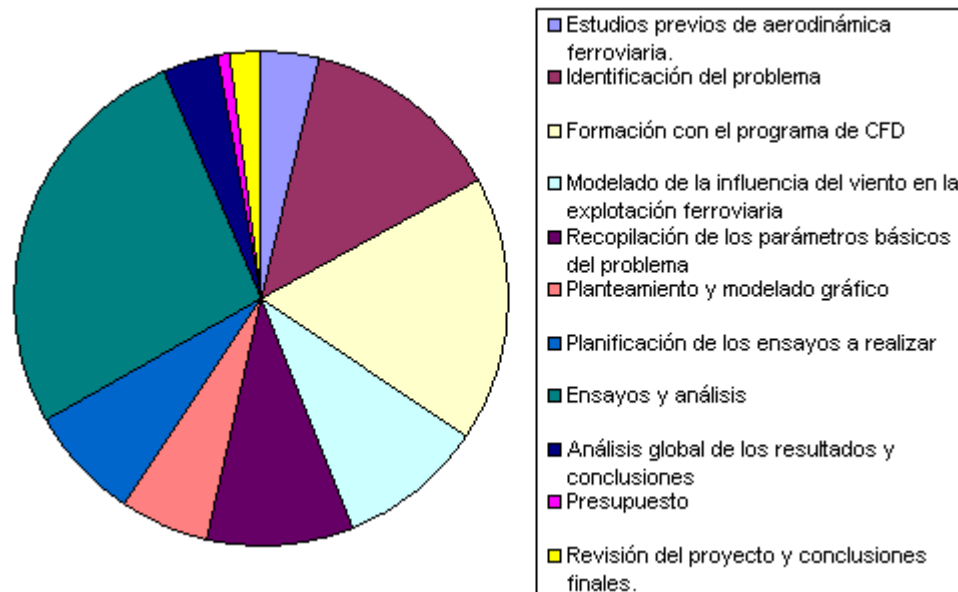


Imagen 7.2: Distribución del tiempo dedicado por horas a cada tarea.

Hay dos tareas que han llevado porcentualmente más tiempo que el resto. Una ha sido la preparación y formación en el manejo del programa CFD, fue una de las partes para la que más tiempo se planificó, porque era de vital importancia adquirir una gran destreza con el manejo del programa para poder aprovechar todo su potencial.

La otra tarea que ha consumido buena parte de las horas planificadas para el proyecto ha sido la simulación de los ensayos con el programa de CFD. La complejidad de los ensayos hizo que llevaran más tiempo del que se había inicialmente programado para su convergencia, lo que implicaba un retraso en la planificación temporal.

Como era un problema de tiempo de iteración, se resolvió doblando durante un periodo de tres meses la asignación de recursos informáticos prevista al inicio, para conseguir cumplir de esta forma con los plazos prefijados.

7.2.- PRESUPUESTO.

El presupuesto derivado de la ejecución y desarrollo del presente Proyecto se puede dividir en tres partidas que se estudiarán por separado.

Costes de ingeniería.

En esta partida se recoge el coste económico del tiempo empleado en la búsqueda y análisis de bibliografía, las diferentes reuniones con el tutor del proyecto y otros expertos, el aprendizaje de los diferentes programas usados a lo largo del Proyecto, el preproceso y el postproceso de las simulaciones numéricas y la redacción de la documentación del Proyecto.

Los costes de ingeniería que se detallan a continuación, se miden en relación al tiempo dedicado a cada una de las tareas antes descritas en la planificación del proyecto, y previamente definidas en la EDP, y en base a los porcentajes por horas que se mostraban en la figura 7.2.

Teniendo en cuenta que el coste unitario de la hora de trabajo proyectando de un ingeniero sin experiencia es de 35€/h, con un total de 1.040 horas, resulta un coste total de ingeniería de:

$$13[\text{meses}] \times 4 \frac{[\text{semanas}]}{[\text{mes}]} \times 20 \frac{[\text{horas}]}{[\text{semana}]} \times 35 \frac{[\text{€}]}{[\text{hora}]} = 36.400\text{€} \quad (7.2.1.1)$$

Costes materiales.

Los costes materiales del proyecto se componen de dos ordenadores totalmente equipados y con conexión, dotados de las herramientas de software necesarias, tales como sistema operativo y paquete de ofimática.

Se ha empleado ordenadores dotados de cierta potencia para poder afrontar las simulaciones en poco tiempo. Exactamente se ha recurrido a PCs comerciales de 2048Mb de RAM con un procesador de 2,6GHz.

Estimando el coste de estos ordenadores completamente equipados en 1.200€ (IVA no incluido) cada uno, y su vida útil en 3 años con un valor residual final de 200€, como el PC se ha empleado durante 12 meses uno y durante 3 meses el otro:

$$Amortización = \frac{1200€ - 300€}{36meses} = 25€ / mes$$

$$\begin{cases} Uso PC1 = 12meses \\ Uso PC2 = 3meses \end{cases}$$

$$Coste Total = 15meses \times 25€ / mes = 375€$$

Al haberse realizado el proyecto dentro de las instalaciones de la escuela, no se consideraran ni los gastos de luz ni los de Internet, ya que se puede suponer que se hubiera incurrido igualmente en ellos si no se hubiera realizado el proyecto.

Costes de licencias.

Para la realización de este proyecto, además del Software que se incluye con el PC, sistema operativo, programas de ofimática, y programas de diseño gráfico básicos, han sido necesarios tres programas que necesitan de licencias aparte.

Los precios comerciales de estas licencias por un año son:

- Programa de CFD FLUENT 6.0: 5.000€.
- Programa GAMBIT 2.0.0 de diseño gráfico y diseño de mallados asociado a FLUENT: 1.680€
- Programa CATIA V5 de diseño gráfico: 5.500€.

La parte del proyecto que necesita de estos programas se desarrolla en exactamente 11 meses, por lo que se contabilizarán los costes de las licencias completas compradas por un año.

Los costes totales de las licencias son: 12.180€ sin IVA.

Costes totales del proyecto:

El coste total del proyecto es la suma de los costes de ingeniería, los costes de material y los costes de las licencias, aplicándole el 16% del IVA para obtener el coste final.

Concepto	Medición	Precio unitario (€/variable)	Total
Costes de ingeniería	1.040 horas	35€/hora	36.400€
Costes de material (ordenadores)	15 meses	25€/mes	375€
Coste de licencias	1 año	12.180€/año	12.180€
Total sin IVA			48.955€
Total con el 16% de IVA			56.788€

Tabla 7.1. Presupuesto del desarrollo del proyecto.

De forma que el coste total del desarrollo de este proyecto es de 48.955€ sin aplicar el IVA, y de 56.788€ con el IVA del 16%.

Esta estimación de costes solo incluye el desarrollo y elaboración del presente proyecto, por tanto no se incluyen los costes que tendría la aplicación de las medidas propuestas en este estudio, análisis este que ya se ha realizado en un apartado anterior.

8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.

8.1.- CONCLUSIONES.

En el presente proyecto de investigación se ha realizado un completo estudio sobre la afectación del fenómeno del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad así como un análisis de medidas de mitigación en forma de barreras para-viento.

Una previa documentación del fenómeno ha permitido enfocar el estudio hacia campos hasta ahora no explorados, y presentar una exposición clara de la problemática. Esta documentación previa, junto con una labor de investigación del fenómeno, de sus particularidades y formulación matemática, ha sido fundamental para plantear de forma eficaz los ensayos que se han llevado a cabo con un programa de CFD.

Un total de 182 simulaciones han conseguido una aproximación completa del fenómeno del viento cruzado, realizándose un eficaz estudio en el que se han evaluado las características del viento lateral en el entorno de los diferentes tipos de plataforma ferroviaria, de trenes y de escenarios, consiguiéndose cuantificar, como se ha podido leer en las conclusiones de los ensayos previos, en qué medida estas diferencias afectan a los esfuerzos que actúan sobre cada tren, y obteniéndose una gran cantidad de información al respecto.

Además se han diseñado y ensayados diferentes tipos de barreras para-viento, que como se muestra en las conclusiones de los análisis de optimización, consiguen mitigar los efectos en cada una de las situaciones planteadas. Las barreras se han diseñado de forma que son capaces de proteger con la mayor efectividad posible a todas las composiciones que circulan por la línea estudiada en ambos sentidos, obteniéndose valores de efectividad globales superiores al 90% tanto en vías sobre viaducto como sobre terraplén.

Además el estudio se ha realizado en una situación real, centrándose en una Línea de Alta Velocidad Española que actualmente se ve afectada por vientos fuertes que, como se ha mostrado a lo largo del estudio, no permiten la circulación

de los trenes a su velocidad máxima. De ahí la importancia del trabajo de investigación, que tiene a día de hoy, una posible aplicación práctica de carácter inmediato.

En vistas de esta futura aplicación se ha desarrollado un estudio estructural, de viabilidad y de costes para que un posible cliente pueda evaluar desde estos tres puntos de vista las medidas que se proponen. Además los resultados son perfectamente extrapolables a otras líneas de alta velocidad por las que circulen los mismos trenes RENFE que se han estudiado.

Por tanto, y como se recoge en las valoraciones y conclusiones de los ensayos y análisis, se han alcanzado todos los objetivos técnicos que se establecieron al inicio del proyecto, y además se han conseguido en base a la planificación que fue programa.

Por último decir que este trabajo de investigación y sus resultados han dado lugar a una publicación técnica que ha sido presentada al Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica que organiza la asociación de reconocido prestigio internacional ASME (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos).

Con el título de “Protection High Speed Trains against lateral wind effects” la publicación ha sido aceptada para exposición y defensa dentro del marco de Sistemas de transporte-Symposium sobre sistemas dinámicos en ferrocarriles (número de registro de la publicación: IMECE2009-10353). El citado congreso se celebrará en Florida del 13 al 19 de noviembre de este año.

A nivel personal el proyecto me ha permitido continuar con mi formación, profundizar en un campo apasionante como es el del ferrocarril, y ampliar mis conocimientos de dinámica ferroviaria y de informática, aprendiendo a manejar un programa de dinámica de fluidos computacional.

8.2.- FUTUROS DESARROLLOS.

Aunque el estudio se ha centrado en una determinada línea de alta velocidad, sus resultados pueden ser en un futuro extrapolables a otras líneas, siempre que se realicen los respectivos estudios paramétricos y se ajusten aquellas variables que puedan ser diferentes.

Como futuros desarrollos se plantean tres posibles líneas de investigación:

- Se puede seguir con el desarrollo de barreras para-viento, aunque la eficacia de las aquí estudiadas es bastante alta, siempre pueden añadirse nuevo complementos aerodinámicos que mejoren las aquí planteadas, o optar por otras soluciones, como por ejemplo el uso de barreras porosas.
- Otra posible línea de investigación sería la de comprobar con estudios a escala real o con túnel de viento, los resultados de este estudio, de manera que quedasen plenamente validados.
- También se podrían aprovechar, la gran cantidad de resultados de fuerzas y momentos obtenidos en este estudio, para realizar un análisis dinámico del tren cuando se ve afectado por vientos laterales, usando una herramienta de Simulación Multi-cuerpo (MBS o Multi Body Simulation), lo que permitiría construir unas curvas características de viento que marcasen claramente la velocidad a la que podría circular cada tren sin que peligrase su seguridad en función de la del viento, y no con estimaciones como se hace actualmente.

A nivel personal decir que esta última opción es la que en mi opinión presenta más posibilidades de desarrollo futuro, y aunque se cambia el marco de referencia de las instalaciones al material rodante, es la línea que más me atrae de cara a continuar con este trabajo de investigación emprendido.

9. BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.

Libros y artículos.

(1). Iwnicki, Simon. Handbook of railway vehicle dynamics. CRC Press (2006), ISBN: 9780849333217.

(2)]. Baker, C.J. Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 24, 227–251.

(3). Kwon, H.; Park, Y.; Lee, D.; Kim, M. Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89, 1179–1195.

(4). S.H. Yun, Y.C. Ku, J.H. Rho, T.H. Ko, H.B. Kwon, D.H. Lee. Numerical Study on the Interactions between Rail Vehicle and Wind Fence under Strong Cross Wind -For the Effective Wind Fence Design. Seoul National University, Seoul, Korea; Korea Railway Research Institute, Uiwang, Korea.

(5). Burkhard Schulte-Werning, Remi Gregoire, Antonio Malfatti, Gerd Matschke. TRANSAERO: A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation. Springer (2002). ISBN 3540433163, 9783540433163.

(6). Forschungs und Technologie-Zentrum, Société nationale des chemins de fer français, Deutsche Bahn, Direction de l'infrastructure SNCF. Deufrako-m 1999. Publicado por Deutsche Bahn ; SNCF (1999).

(7). Suzuki, M.; Tanemoto, K.; Maeda, T. Aerodynamic characteristics of train vehicles under cross winds. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91, 209-218. Editorial Elsevier Science (2003). ISSN 0167-6105.

(8). Sanquer, S.; Barre, C.; Dufresne deVirel, M.; Cleon, L-M. “Effect of cross winds on high speed trains; development of a new experimental methodology”, Paper presented at the 11th International Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas (2003).

(9). Dierickx, W.; Cornelis, W.M.; Gabriels, D. Wind tunnel study on rough and smooth surface turbulent approach flow and on inclined windscreens. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(2), 151-166.

(10). Bettle, J.; Holloway, A.G.L.; Venart, J.E.S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle o a bridge on a cross-wind, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91, 573–592.

(11). Delaunay, D.; Cleon, L-M.; Sacre, C.; Sourget, F.; Gautier, P-E. “Designing a wind alarm system for the TGV-Mediterranee”, Paper presented at the 11th International Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas (2003).

(12). Gerd Matschke; Deegb, P.; Schulte-Werning, B.; Grab, M.; Hoppe, C.; Lang, H-P.; Bergander, B. “Proof that rail vehicles can run safely under extreme side winds”, DB Code of Practice 401 (2001).

(13). José C. Martínez, Jorge Iglesias Díaz, Salvador Osma Ruiz, Manuel Rodrigues Fernández, Paula Álvarez Legazpi. Nuevo sistema de medición y control del viento lateral en la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona- Figueras (tramo Madrid- Lérida). VIII Congreso de Ingeniería de transporte, de A Coruña.

(14). Barrado, J. y Lozano, F.J. Incidencia de los fenómenos meteorológicos sobre la explotación de líneas ferroviarias de alta velocidad. Aplicación al tramo Guadalajara- Zaragoza de la nueva línea Madrid- Barcelona- frontera francesa. Programa de Becas de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Memoria final, pp. 10-11. 2000.

(15). Miguel Ángel Barcal Montejano. Tesis sobre el “Uso de parapetos para reducir las cargas del viento lateral en trenes de alta velocidad”. UPM. E. T. S. I. AERONAUTICOS (2005).

(16). C.J. Baker, M. Sterling. Current and Recent International Work on Railway Aerodynamics.. School of Engineering University of Birmingham. A report prepared for Rail Safety and Standards Board. Issue number 4, August 11th 2003.

(17). Bettle, J; Holloway, A.G.L; Venart, J.E.S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle o a bridge on a cross-wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91, 573–592.

(18). Crespo Martínez, A; Mecánica De Fluidos. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I.Industriales. Universidad politécnica de Madrid. ISBN: 84-7484-151-8.

(19). Aparicio Izquierdo, F; Vera Alvarez, C; Díaz López, V (2001). Teoría de los vehículos automóviles. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I.Industriales. Universidad politécnica de Madrid. ISBN: 84-7484-146-1.

(20). García Álvarez, A. (2005), Dinámica de los Trenes en Alta Velocidad. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Dirección de Estudios y Programas. Febrero 2005.

(21). López Pita, A . (2006). Infraestructuras Ferroviarias. Universidad Politécnica de Cataluña. ISBN: 9788483018538.

(23). J. D. Sanz, J. Garzón. Herramienta ntegral de ayuda a la Toma de Decisiones en Puestos de Control Ferroviario”. Congreso de Ingeniería del Transporte. La Coruña. Julio 2008. ISBN 978- 84- 380- 0394- 7.

Normativa:

(24). Directiva 2004/50/CE. Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad.

(25). UNE- EN 1991-1-4: Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.

(26). UNE-EN 50125-1: Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo. Parte 1: Equipos a bordo del material rodante.

(27). UNE-EN 50125-2: Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo. Parte 2: Instalaciones eléctricas fijas.

Páginas webs.

(28). www.wunderground.com/ : Información meteorológica.

(29). www.weatheronline.co.uk/ : Información meteorológica

(30). www.fluent.com/ : Página oficial del programa de CFD FLUENT.

- (31). www.cfd-online.com/ : Página especializada en formación en CFD.
- (32). www.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos : Página del departamento de Energía, Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo.
- (33). www.construmatica.com/ : Base de datos de Ingeniería, arquitectura y construcción.
- (34). www.preoc.es/ : Precios de edificación y obra civil en España.
- (35). www.adif.es/ : Administrador de Infraestructuras Ferroviarias en España.
- (36). www.renfe.es/ : Empresa de servicios de transportes ferroviarios de viajeros y mercancías depende del Ministerio de Fomento
- (37). www.talgo.es/ : Página web de la empresa privada TALGO.
- (38). www.siemens.com/ : Página web de la empresa privada SIEMENS.

ANEXOS

Anexo A: Datos meteorológicos.....	290
A.1. Observaciones generales.....	290
A.2. Datos de la estación meteorológica de Zaragoza.....	291
A.3. Datos de la estación meteorológica de Lérida.....	304
A.3. Valoración general de los datos.....	317
Anexo B: Método de discretización de las ecuaciones de flujo.....	319
Anexo C. Resultados de los ensayos previos....	323
C.1. Ensayo 0.	323
C.2. Ensayo 1.	328
C.3. Ensayo 2.	337
C.4. Ensayo 3.	346
C.5. Ensayo 4.	351
Anexo D. Resultados de los ensayos de optimización.	355
D.1. Ensayo 5.	355
D.2. Ensayo 6.	356
D.3. Ensayo 7.	358
D.4. Ensayo 8.	359

ANEXO A

ANEXO A: DATOS METEOROLÓGICOS.

A.1. OBSERVACIONES GENERALES.

Este anexo recoge los datos de dos estaciones meteorológicas extraídos de las páginas www.weatheronline.co.uk y www.wunderground.com. Estos datos están accesibles a cualquiera, y no hay ninguna restricción que permita su empleo, por lo tanto son de libre acceso.

Los gráficos, y tablas recogidos en este anexo son de elaboración propia, a excepción de las gráficas de dirección del viento, ya que su planteamiento se elabora con análisis estadísticos y en la página citada no se publican estos datos, solo las gráficas.

En este anexo se exponen los datos recogidos desde el día 1 de Enero de 2005 hasta el día 30 de septiembre de 2008. Tan solo faltan algunos datos de días puntuales que se deben a fallos en el equipo de medición o periodos de mantenimiento.

Las estaciones meteorológicas de las que se han obtenido los datos están situadas en Zaragoza y Lérida. La siguiente figura muestra la disposición geográfica de ambas y la cercanía a la línea de alta velocidad dibujada en azul.

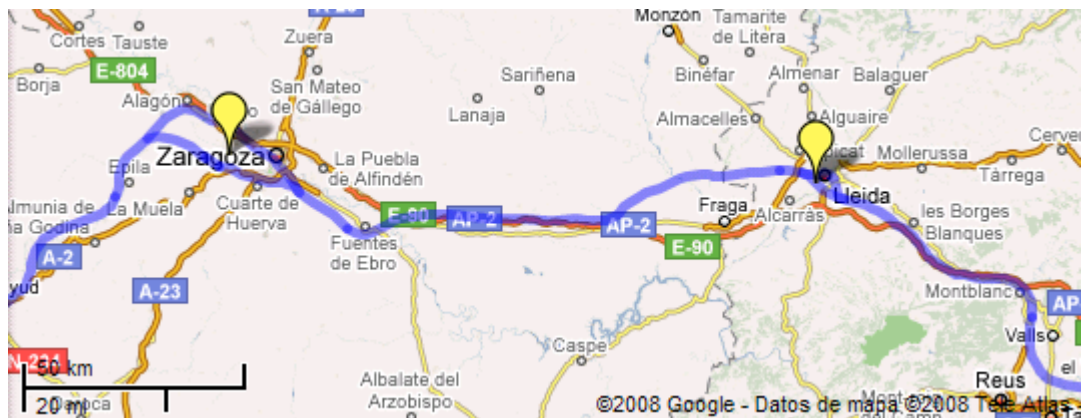


Imagen A.1: Situación de las estaciones meteorológicas en amarillo, cercanas a la línea azul que marca el trazado de la LAV. Elaboración propia con Google Maps.

A.2. DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE ZARAGOZA.

A.2.1.SITUACIÓN GEOGRÁFICA.

Esta estación meteorológica está situada en el aeropuerto de Zaragoza, entre las vía principal que se emplea para hacer el trayecto directo Madrid-Barcelona y la vía de desvío que va a Zaragoza centro.



Imagen A.2: En amarillo marcada la situación de la estación meteorológica y en azul las LAV. Elaboración propia con Google Maps.

A.2.2. DATOS RECOPIRADOS.

Día del mes	2005			Día del mes	2005			Día del mes	2005		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	8,94	6,26		07-mar	12,96	8,94	17,43	11-may	6,71	2,24	
02-ene	12,52	7,60		08-mar	11,62	8,49	14,75	12-may	8,94	3,13	
03-ene	11,18	9,39		09-mar	11,18	6,71		13-may	6,26	1,34	
04-ene	3,58	1,34		10-mar	9,83	9,39		14-may	4,47	3,58	
05-ene	0,45	0,00		11-mar	8,94	3,58		15-may	6,71	0,89	
06-ene	4,02	1,79		12-mar	4,47	0,00		16-may	10,28	1,34	
07-ene	2,68	2,68		13-mar	2,68	0,45		17-may	13,86	6,71	19,67
08-ene	3,58	0,45		14-mar	5,81	2,24		18-may	11,18	11,18	
09-ene	1,79	0,00		15-mar	4,02	2,68		19-may	5,81	4,47	
10-ene	4,47	0,00		16-mar	5,36	3,13		20-may	6,71	1,79	
11-ene	4,02	4,02		17-mar	4,02	0,45		21-may	6,26	3,58	
12-ene	4,02	0,89		18-mar	5,36	2,24		22-may	8,94	3,13	
13-ene	2,68	1,79		19-mar	4,02	0,45		23-may	8,05	7,15	
14-ene	3,13	0,00		20-mar	3,13	2,68		24-may	4,02	2,24	
15-ene	3,13	2,24		21-mar	6,71	2,24		25-may	5,36	2,68	
16-ene	3,13	0,47		22-mar	6,71	6,26		26-may	7,15	3,58	
17-ene	3,13	0,89		23-mar	8,94	0,89		27-may	7,15	5,36	
18-ene	12,96	1,79		24-mar	7,15	3,58		28-may	7,15	4,47	
19-ene	16,09	8,05	21,01	25-mar	7,15	2,68		29-may	7,60	3,13	
20-ene	13,86	12,52	17,43	26-mar	6,71	1,79		30-may	10,73	6,26	14,31
21-ene	15,20	9,83	19,22	27-mar	9,39	6,26		31-may	8,05	7,15	
22-ene	11,62	10,28	16,54	28-mar	9,39	3,58		01-jun	8,05	7,60	
23-ene	9,39	5,36		29-mar	7,15	5,36	11,62	02-jun	7,15	7,15	
24-ene	20,12	8,49	26,38	30-mar	10,73	4,47	16,09	03-jun	11,18	2,68	15,20
25-ene	12,52	8,94	15,20	31-mar	8,94	5,81		04-jun	10,73	8,94	
26-ene	12,96	6,71	19,22	01-abr	9,39	3,58		05-jun	9,83	8,94	
27-ene	13,41	9,39	17,88	02-abr	7,15	5,36		06-jun	12,96	8,94	15,20
28-ene	12,52	9,39	16,99	03-abr	9,39	4,02		07-jun	11,18	10,28	
29-ene	14,75	8,94	20,56	04-abr	4,47	3,13		08-jun	6,71	6,71	
30-ene	13,41	7,15	14,75	05-abr	4,47	2,24		09-jun	9,39	5,36	
31-ene	12,96	9,83	16,09	06-abr	5,36	2,68		10-jun	8,94	6,26	
01-feb	14,75	8,49	20,12	07-abr	9,83	4,02	11,18	11-jun	11,18	5,81	
02-feb	12,52	10,28	16,99	08-abr	12,96	8,05	18,33	12-jun	8,94	3,13	14,31
03-feb	11,62	9,83	14,31	09-abr	16,99	10,73	22,35	13-jun	8,05	1,34	
04-feb	5,36	4,92		10-abr	16,99	10,73	24,14	14-jun	7,60	4,47	
05-feb	3,13	0,45		11-abr	14,31	12,52	20,56	15-jun	4,47	4,02	
06-feb	5,81	0,89		12-abr	16,09	9,83	19,67	16-jun	11,62	4,47	15,20
07-feb	5,81	3,58		13-abr	9,83	9,39		17-jun	9,39	7,60	
08-feb	3,13	2,24		14-abr	10,28	2,68		18-jun	4,02	3,13	
09-feb	3,58	0,00		15-abr	8,94	7,60	10,28	19-jun	6,26	0,89	
10-feb	4,47	1,34		16-abr	15,20	4,47	16,99	20-jun	11,62	4,92	
11-feb	8,94	2,68		17-abr	7,15	6,71		21-jun	10,28	1,79	
12-feb	8,94	6,26		18-abr	11,62	1,79		22-jun	9,39	3,13	12,52
13-feb	14,31	5,36	22,35	19-abr	7,15	5,36		23-jun	16,99	1,34	20,56
14-feb	14,31	9,83	19,67	20-abr	6,71	4,02		24-jun	8,94	2,24	
15-feb	16,54	11,62	21,01	21-abr	7,15	2,68		25-jun	8,94	3,13	
16-feb	15,20	7,60	21,01	22-abr	7,15	4,92		26-jun	8,05	4,92	
17-feb	16,99	11,18	21,46	23-abr	5,36	4,47		27-jun	22,80	4,02	27,27
18-feb	13,86	8,94	18,33	24-abr	8,05	1,79		28-jun	11,62	4,02	16,54
19-feb	13,86	8,05	18,33	25-abr	4,47	2,68		29-jun	7,60	0,89	
20-feb	11,18	9,39	14,31	26-abr	5,36	1,79		30-jun	11,18	4,92	15,20
21-feb	11,18	6,26	16,99	27-abr	4,47	2,68		01-jul	10,28	8,94	
22-feb	5,36	3,58		28-abr	4,02	3,13		02-jul	8,94	6,71	
23-feb	4,02	4,02		29-abr	5,81	2,24		03-jul	6,71	0,45	
24-feb	4,47	0,89		30-abr	8,05	3,13		04-jul	12,52	5,36	16,54
25-feb	4,02	2,68		01-may	8,05	2,24	13,41	05-jul	10,73	8,05	15,20
26-feb	6,26	0,00		02-may	6,71	5,36		06-jul	8,94	8,49	11,18
27-feb	12,96	2,24	16,54	03-may	6,26	0,89		07-jul	13,41	8,05	17,43
28-feb	13,86	11,18	18,33	04-may	9,83	5,36		08-jul	10,73	9,83	15,20
01-mar	7,60	6,71		05-may	13,86	8,49	19,67	09-jul	11,18	9,39	
02-mar	5,81	1,79		06-may	11,62	10,28	16,99	10-jul	11,18	9,83	
03-mar	9,39	4,92		07-may	7,60	6,71		11-jul	7,60	6,71	
04-mar	14,31	6,71	19,22	08-may	7,15	4,92		12-jul	8,94	7,60	
05-mar	12,52	6,26	14,75	09-may	5,36	4,47		13-jul	9,83	4,92	
06-mar	11,18	4,47		10-may	7,60	1,79	12,96	14-jul	9,83	1,79	

Día del mes	2005			Día del mes	2005			Día del mes	2005		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	7,60	6,26		18-sep	13,41	12,07	18,33	22-nov	6,71	0,45	
16-jul	6,26	4,02		19-sep	9,39	8,49		23-nov	15,20	5,81	20,56
17-jul	11,62	3,58		20-sep	8,94	5,81		24-nov	17,43	12,07	23,69
18-jul	10,28	9,39		21-sep	6,71	5,36		25-nov	12,96	5,36	
19-jul	8,05	6,26		22-sep	3,13	0,00		26-nov	8,94	5,36	
20-jul	7,15	6,71		23-sep	3,58	1,79		27-nov	11,18	3,58	
21-jul	7,60	7,60		24-sep	4,47	2,68		28-nov	7,15	3,13	
22-jul	10,73	8,05		25-sep	10,28	3,58		29-nov	9,39	1,79	
23-jul	8,94	8,05		26-sep	10,28	9,83		30-nov	7,15	5,36	
24-jul	6,71	2,68		27-sep	3,13	0,45		01-dic	6,71	5,36	
25-jul	8,05	7,60		28-sep	5,36	1,79		02-dic	9,83	3,58	
26-jul	3,13	0,45		29-sep	10,28	1,79	16,09	03-dic	10,73	3,13	
27-jul	5,81	4,92		30-sep	9,83	8,49		04-dic	8,05	2,24	
28-jul	6,26	3,58		01-oct	11,62	5,36	16,09	05-dic	10,73	3,13	16,99
29-jul	9,39	2,24		02-oct	12,96	9,39	17,88	06-dic	9,83	3,13	
30-jul	9,39	8,49	11,18	03-oct	15,20	10,73		07-dic	5,36	4,47	
31-jul	9,83	8,05		04-oct	8,94	7,15		08-dic	8,94	0,89	
01-ago	9,83	5,36		05-oct	7,15	5,36		09-dic	13,86	5,81	19,22
02-ago	11,62	8,05	14,31	06-oct	4,02	4,02		10-dic	9,39	8,49	
03-ago	10,28	8,49		07-oct	5,36	2,68		11-dic	7,60	3,58	
04-ago	10,28	9,39		08-oct	4,02	2,68		12-dic	6,71	2,68	
05-ago	8,94	7,15		09-oct	4,47	0,89		13-dic	9,39	6,26	
06-ago	8,94	8,05		10-oct	6,26	4,47		14-dic	14,75	7,60	20,12
07-ago	11,62	7,60		11-oct	6,71	5,36		15-dic	12,96	10,73	17,88
08-ago	7,60	2,68		12-oct	6,26	2,24		16-dic	11,62	6,26	16,09
09-ago	9,39	5,36		13-oct	5,36	3,13		17-dic	16,54	8,94	21,46
10-ago	8,05	4,02		14-oct	8,05	1,79		18-dic	14,75	12,07	17,43
11-ago	11,18	4,47	16,09	15-oct	5,36	0,45		19-dic	3,13	2,68	
12-ago	9,39	8,05		16-oct	3,13	0,45		20-dic	2,24	0,00	
13-ago	8,94	4,92		17-oct	2,68	0,89		21-dic	4,47	0,45	
14-ago	9,39	4,92		18-oct	4,02	1,79		22-dic	3,13	0,00	
15-ago	9,83	7,60		19-oct	7,15	1,34		23-dic	2,24	0,45	
16-ago	7,60	4,47		20-oct	4,02	1,34		24-dic	2,24	0,00	
17-ago	8,94	4,92	12,96	21-oct	7,60	2,68		25-dic	2,24	1,79	
18-ago	8,05	2,24		22-oct	5,36	3,58		26-dic	0,89	0,00	
19-ago	10,28	6,71	12,52	23-oct	9,39	0,89		27-dic	9,83	0,00	
20-ago	11,62	9,83	17,43	24-oct	5,81	4,02		28-dic	8,94	6,71	
21-ago	12,52	7,15	16,54	25-oct	3,58	1,34		29-dic	6,26	2,24	
22-ago	12,96	8,94	17,88	26-oct	7,15	0,89		30-dic	5,36	3,13	
23-ago	11,18	8,94		27-oct	9,83	4,47	13,41	31-dic	9,39	0,89	11,62
24-ago	8,94	8,49		28-oct	7,60	4,92	10,28				
25-ago	7,60	2,68		29-oct	5,81	1,79					
26-ago	7,60	7,60		30-oct	8,94	4,92					
27-ago	5,81	2,68		31-oct	8,05	6,26					
28-ago	6,71	5,81		01-nov	6,71	2,68					
29-ago	7,60	4,47		02-nov	3,58	1,34					
30-ago	7,15	4,92		03-nov	3,13	1,79					
31-ago	7,60	5,36		04-nov	9,83	1,79					
01-sep	4,47	2,24		05-nov	9,83	8,05	13,86				
02-sep	5,36	2,68		06-nov	4,02	2,68					
03-sep	4,47	4,02		07-nov	2,68	0,45					
04-sep	4,47	4,02		08-nov	5,36	1,79					
05-sep	8,94	4,02		09-nov	13,86	2,68	19,22				
06-sep	9,39	7,15		10-nov	12,52	10,28	16,99				
07-sep	6,71	4,47		11-nov	6,71	6,26					
08-sep	7,60	2,24		12-nov	5,36	0,89					
09-sep	6,26	2,24		13-nov	9,39	4,92					
10-sep	8,05	4,02	10,28	14-nov	4,02	1,79					
11-sep	5,81	2,24		15-nov	5,36	1,79					
12-sep	9,39	3,58		16-nov	10,28	4,92					
13-sep	7,15	6,71		17-nov	10,73	8,94					
14-sep	5,36	4,92		18-nov	6,71	4,47					
15-sep	4,02	3,13		19-nov	3,13	1,79					
16-sep	8,05	4,02		20-nov	5,36	2,68					
17-sep	16,09	7,15	21,01	21-nov	3,13	2,68					

Tabla A.1: Valores de viento en Zaragoza en 2005

Día del mes	2006			Día del mes	2006			Día del mes	2006		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	9,83	3,13		07-mar	9,83	9,83		11-may	7,15	0,89	12,96
02-ene	10,73	7,60	16,09	08-mar	8,05	7,60		12-may	5,36	1,79	
03-ene	13,86	8,05	18,33	09-mar	14,75	3,13	21,46	13-may	6,26	3,58	
04-ene	10,73	10,28	15,20	10-mar	8,94	6,26		14-may	6,26	3,58	
05-ene	5,81	4,92		11-mar	11,18	4,02	16,09	15-may	7,15	4,02	
06-ene	5,36	0,89		12-mar	16,09	8,05	20,12	16-may	5,36	3,58	
07-ene	3,13	1,79		13-mar	8,94	7,15		17-may	5,36	0,45	
08-ene	4,02	0,45		14-mar	3,58	2,24		18-may	7,60	2,24	
09-ene	6,26	0,89		15-mar	4,02	1,79		19-may	9,83	8,49	
10-ene	4,47	4,02		16-mar	4,47	4,02		20-may	6,26	2,24	
11-ene	4,47	0,89		17-mar	8,05	4,47		21-may	8,05	2,24	
12-ene	2,24	0,45		18-mar	7,15	5,81		22-may	9,39	1,79	9,83
13-ene	3,58	1,34		19-mar	6,71	4,47		23-may	9,83	6,71	
14-ene	2,24	2,24		20-mar	4,02	3,58		24-may	9,39	7,15	
15-ene	5,36	0,89		21-mar	7,15	2,68		25-may	7,60	3,58	12,52
16-ene	3,13	2,68		22-mar	7,60	2,68		26-may	9,39	8,05	
17-ene	5,81	1,79		23-mar	6,26	2,68		27-may	7,15	5,81	
18-ene	11,62	4,02	16,99	24-mar	9,39	1,79		28-may	5,81	2,24	
19-ene	8,94	8,05		25-mar	8,05	4,02		29-may	13,41	6,71	
20-ene	4,02	2,68		26-mar	6,71	1,34		30-may	14,31	8,94	19,22
21-ene	5,81	4,02		27-mar	7,60	1,79		31-may	11,62	10,28	16,09
22-ene	7,60	2,68		28-mar	9,39	2,68		01-jun	11,18	8,49	
23-ene	5,36	0,89		29-mar	5,36	1,79		02-jun	11,62	9,39	16,54
24-ene	4,02	2,68		30-mar	5,81	1,79		03-jun	10,73	9,39	
25-ene	5,36	0,45		31-mar	6,71	1,79		04-jun	9,83	8,49	
26-ene	10,28	0,89		01-abr	5,36	1,79		05-jun	7,15	6,26	
27-ene	7,60	4,02		02-abr	4,02	1,34		06-jun	5,81	4,92	
28-ene	9,83	6,26		03-abr	5,81	4,47		07-jun	6,26	1,34	
29-ene	5,36	1,34		04-abr	9,39	0,89		08-jun	7,60	6,26	
30-ene	8,94	3,58		05-abr	11,18	2,24	13,41	09-jun	10,73	5,36	13,41
31-ene	8,05	4,47		06-abr	6,26	5,81		10-jun	7,60	4,02	
01-feb	4,02	1,79		07-abr	5,36	0,89		11-jun	7,60	1,79	
02-feb	2,68	1,79		08-abr	3,58	1,79		12-jun	9,39	4,47	
03-feb	5,36	2,68		09-abr	11,62	3,13		13-jun	8,05	4,47	
04-feb	10,28	4,92		10-abr	11,62	9,39	16,99	14-jun	8,05	4,92	
05-feb	9,39	7,15		11-abr	11,18	10,28		15-jun	7,60	4,47	
06-feb	8,05	5,81		12-abr	12,52	4,02	16,54	16-jun	8,94	4,92	
07-feb	6,26	5,81		13-abr	10,73	9,83		17-jun	5,81	0,89	
08-feb	9,39	0,89		14-abr	7,60	1,79		18-jun	4,02	2,68	
09-feb	10,28	7,60		15-abr	7,60	4,92		19-jun	5,36	1,79	
10-feb	10,28	8,05		16-abr	4,47	2,68		20-jun	8,05	5,36	
11-feb	6,26	2,24		17-abr	11,62	2,68		21-jun	7,60	5,81	
12-feb	6,26	5,36		18-abr	12,52	8,94		22-jun	8,94	4,47	
13-feb	6,26	4,92		19-abr	7,60	6,26		23-jun	10,73	7,15	
14-feb	3,58	1,79		20-abr	6,71	6,26		24-jun	13,86	4,02	
15-feb	5,81	1,79		21-abr	8,94	5,81		25-jun	6,71	3,13	
16-feb	11,62	2,68	16,54	22-abr	4,47	2,24		26-jun	9,83	4,02	
17-feb	12,52	9,39		23-abr	4,47	0,00		27-jun	6,71	5,36	
18-feb	11,62	4,02		24-abr	4,47	2,24		28-jun	7,15	4,47	
19-feb	16,99	5,81	23,69	25-abr	10,28	0,89		29-jun	6,71	4,92	
20-feb	9,83	5,36		26-abr	9,83	6,71		30-jun	6,71	5,36	
21-feb	8,05	3,13	10,73	27-abr	12,96	7,15	16,99	01-jul	4,02	1,79	
22-feb	7,60	7,15		28-abr	14,31	8,94	20,12	02-jul	6,26	5,36	
23-feb	8,05	4,92		29-abr	13,86	10,73	18,33	03-jul	8,94	3,13	
24-feb	10,73	7,60	12,52	30-abr	13,41	12,07		04-jul	8,94	4,02	
25-feb	4,47	1,79		01-may	3,58	3,13		05-jul	10,73	9,39	
26-feb	7,60	2,24		02-may	9,39	3,13		06-jul	9,83	8,94	
27-feb	13,86	7,60	18,33	03-may	9,83	5,81	14,75	07-jul	9,83	8,49	
28-feb	12,96	8,49	16,09	04-may	6,26	0,45		08-jul	6,71	5,36	
01-mar	8,94	7,15		05-may	5,81	1,79		09-jul	6,71	3,13	
02-mar	9,39	3,58		06-may	7,60	4,02		10-jul	7,15	6,26	
03-mar	10,28	6,71		07-may	7,60	4,47		11-jul	10,28	4,47	
04-mar	16,54	3,58	21,46	08-may	6,71	0,45		12-jul	7,60	7,15	
05-mar	19,67	7,60	27,72	09-may	4,47	4,47		13-jul	10,73	7,60	
06-mar	12,96	9,39	14,75	10-may	5,81	2,24		14-jul	7,60	1,34	

Día del mes	2006			Día del mes	2006			Día del mes	2006		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	11,18	3,13		18-sep	9,39	6,26		22-nov	7,60	3,13	
16-jul	7,15	2,68		19-sep	7,15	4,47		23-nov	10,28	7,60	
17-jul	6,26	2,24		20-sep	5,81	0,89		24-nov	6,71	2,24	
18-jul	9,83	4,92	14,75	21-sep	11,62	4,02	16,54	25-nov	8,05	6,26	
19-jul	13,41	1,79	18,33	22-sep	9,39	6,71		26-nov	3,58	1,79	
20-jul	4,47	3,58		23-sep	5,81	0,89		27-nov	3,58	0,89	
21-jul	5,36	3,13		24-sep	7,60	2,24		28-nov	3,58	1,34	
22-jul	6,71	2,68		25-sep	8,94	3,58		29-nov	7,15	4,92	
23-jul	7,60	6,26		26-sep	12,52	4,02	17,43	30-nov	4,47	2,24	
24-jul	5,81	2,68		27-sep	9,39	8,49		01-dic	4,02	2,68	
25-jul	6,57	6,71	12,52	28-sep	3,13	1,79		02-dic	4,02	2,68	
26-jul	8,05	1,34	0,00	29-sep	4,47	0,89		03-dic	4,47	0,45	
27-jul	12,96	3,58	19,67	30-sep	3,58	2,68		04-dic	9,39	5,81	
28-jul	9,39	6,71		01-oct	5,36	1,34		05-dic	6,26	1,79	
29-jul	9,39	7,60		02-oct	4,47	0,89		06-dic	14,31	8,49	18,33
30-jul	9,39	2,68		03-oct	13,41	2,68	13,41	07-dic	8,05	3,13	
31-jul	8,94	8,49		04-oct	6,71	4,02		08-dic	12,52	2,68	
01-ago	9,83	7,15		05-oct	9,39	5,81		09-dic	10,73	7,60	16,09
02-ago	8,94	6,26		06-oct	4,02	3,13		10-dic	8,05	5,36	
03-ago	12,52	4,92	14,31	07-oct	7,15	1,79		11-dic	3,58	2,68	
04-ago	14,75	10,73	19,67	08-oct	4,47	3,13		12-dic	2,68	1,79	
05-ago	16,54	11,18	23,25	09-oct	5,36	4,02		13-dic	3,13	2,24	
06-ago	14,31	12,07	19,67	10-oct	5,36	2,24		14-dic	2,68	2,24	
07-ago	10,73	9,83		11-oct	10,73	4,02	16,54	15-dic	3,58	0,89	
08-ago	12,52	10,28		12-oct	10,73	6,26	12,96	16-dic	4,47	2,68	
09-ago	12,96	9,83	15,20	13-oct	5,81	4,47		17-dic	10,28	0,00	
10-ago	11,18	9,39		14-oct	4,02	0,45		18-dic	10,28	8,05	
11-ago	11,18	8,94		15-oct	7,15	1,34		19-dic	10,73	6,26	
12-ago	11,62	8,05	16,54	16-oct	9,39	4,47		20-dic	7,15	5,36	
13-ago	8,05	6,26		17-oct	10,28	5,81		21-dic	9,39	6,26	
14-ago	6,26	6,26		18-oct	6,71	4,02		22-dic	3,58	2,68	
15-ago	7,60	3,58		19-oct	6,71	2,68		23-dic	5,36	1,34	
16-ago	5,81	4,47		20-oct	5,36	3,58		24-dic	6,71	4,47	
17-ago	10,28	4,47	15,20	21-oct	4,47	0,89		25-dic	6,26	6,26	
18-ago	4,47	0,45		22-oct	6,26	4,02		26-dic	2,68	0,45	
19-ago	5,81	3,58		23-oct	6,71	3,13	7,15	27-dic	1,79	0,89	
20-ago	6,71	4,47		24-oct	5,81	3,58		28-dic	0,00	0,00	
21-ago	5,81	5,36		25-oct	8,94	4,02		29-dic	0,00	0,00	
22-ago	6,71	5,36		26-oct	6,26	4,02		30-dic	4,02	0,00	
23-ago	7,60	1,79		27-oct	3,13	0,45		31-dic	4,47	0,45	
24-ago	9,83	6,26		28-oct	2,24	0,00					
25-ago	8,05	6,71		29-oct	6,26	0,45					
26-ago	10,73	6,26	14,75	30-oct	6,71	4,02					
27-ago	9,83	8,49		31-oct	8,94	0,89					
28-ago	7,60	6,26		01-nov	10,73	6,71	13,86				
29-ago	8,05	5,81		02-nov	8,94	7,60					
30-ago	12,52	4,92	16,99	03-nov	5,81	0,45					
31-ago	7,60	5,81		04-nov	5,36	3,58					
01-sep	4,02	3,13		05-nov	4,47	3,13					
02-sep	5,36	2,68		06-nov	4,02	0,89					
03-sep	5,36	4,47		07-nov	3,58	1,79					
04-sep	4,02	0,45		08-nov	2,68	0,45					
05-sep	5,36	3,58		09-nov	2,24	0,89					
06-sep	6,71	4,02		10-nov	3,58	0,45					
07-sep	7,15	3,58		11-nov	6,26	2,68					
08-sep	5,36	1,79		12-nov	11,62	6,26	14,75				
09-sep	5,81	1,34		13-nov	10,28	6,71					
10-sep	6,71	4,47		14-nov	4,02	2,68					
11-sep	10,28	1,79	15,20	15-nov	5,36	2,68					
12-sep	6,71	0,89		16-nov	6,71	4,92					
13-sep	7,60	1,34		17-nov	6,71	4,02					
14-sep	9,39	1,34		18-nov	7,15	1,79					
15-sep	11,62	6,71	16,99	19-nov	3,58	1,79					
16-sep	11,62	7,15		20-nov	5,81	0,89					
17-sep	10,28	6,26		21-nov	12,52	5,36					

Tabla A.2: Valores de viento en Zaragoza en 2006

Día del mes	2007			Día del mes	2007			Día del mes	2007		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	4,47	2,24		07-mar	20,12	4,02	30,40	11-may	4,47	4,02	
02-ene	11,18	5,81		08-mar	17,43	12,96	23,25	12-may	4,47	1,34	
03-ene	11,62	8,05		09-mar	14,31	8,49	20,12	13-may	7,60	0,89	10,28
04-ene	6,71	0,89		10-mar	15,20	12,52	21,46	14-may	9,83	4,47	
05-ene	11,18	5,36		11-mar	10,28	6,71		15-may	8,94	3,58	
06-ene	5,81	4,02		12-mar	4,47	2,68		16-may	12,52	4,47	13,41
07-ene	4,02	0,00		13-mar	3,13	0,45		17-may	12,52	8,49	17,43
08-ene	3,13	2,24		14-mar	6,26	2,68		18-may	9,39	8,49	
09-ene	4,47	1,34		15-mar	4,02	0,00		19-may	6,71	3,13	
10-ene	4,47	3,58		16-mar	8,94	0,89		20-may	9,83	3,13	
11-ene	6,71	4,02		17-mar	12,96	8,49	16,09	21-may	6,26	4,92	
12-ene	11,18	8,05		18-mar	8,94	8,05		22-may	7,60	4,02	
13-ene	4,02	2,68		19-mar	16,99	5,36	21,46	23-may	5,81	0,89	
14-ene	5,81	3,13		20-mar	13,41	10,73	17,43	24-may	9,83	2,68	14,75
15-ene	3,13	1,79		21-mar	14,75	9,39	20,12	25-may	7,15	2,24	12,52
16-ene	3,13	0,45		22-mar	14,31	10,28	19,67	26-may	7,60	3,58	
17-ene	3,58	0,45		23-mar	12,96	8,05	14,75	27-may	16,54	5,36	9,39
18-ene	6,26	1,79		24-mar	12,96	6,26	18,33	28-may	12,52	6,26	17,88
19-ene	7,60	0,45		25-mar	9,39	5,36		29-may	6,71	3,58	
20-ene	6,26	2,68		26-mar	7,60	3,13		30-may	4,47	1,79	
21-ene	6,71	2,24		27-mar	6,71	4,92		31-may	8,05	3,13	
22-ene	8,05	0,89		28-mar	5,81	4,47		01-jun	9,83	4,02	
23-ene	11,62	9,83		29-mar	10,73	4,92	14,75	02-jun	13,86	6,26	17,88
24-ene	8,94	6,71	11,62	30-mar	9,39	6,71		03-jun	8,94	7,60	
25-ene	8,05	6,26	13,86	31-mar	9,39	4,02	13,86	04-jun	11,62	6,26	
26-ene	10,73	8,94	13,41	01-abr	4,02	2,68		05-jun	6,71	5,81	
27-ene	8,94	6,71		02-abr	7,15	4,02		06-jun	5,81	0,89	
28-ene	5,36	4,02		03-abr	6,71	1,34		07-jun	2,68	1,79	
29-ene	2,24	0,89		04-abr	17,88	6,71	22,80	08-jun	2,68	1,34	
30-ene	3,13	0,89		05-abr	5,81	5,36		09-jun	7,15	1,79	
31-ene	6,26	2,68		06-abr	5,81	2,24		10-jun	3,58	1,79	
01-feb	10,28	5,81		07-abr	5,36	1,34		11-jun	4,47	4,02	
02-feb	5,81	4,47		08-abr	3,13	0,00		12-jun	4,47	1,79	
03-feb	2,24	0,89		09-abr	5,81	0,89		13-jun	6,71	2,24	
04-feb	3,13	1,79		10-abr	5,81	2,68		14-jun	7,60	4,47	9,83
05-feb	2,68	1,79		11-abr	6,26	3,13		15-jun	8,94	4,02	
06-feb	5,36	2,68		12-abr	9,39	2,24		16-jun	3,58	3,13	
07-feb	7,60	4,92		13-abr	7,15	2,68		17-jun	8,05	2,68	
08-feb	5,81	4,02		14-abr	8,05	5,81		18-jun	6,71	1,34	
09-feb	16,54	3,58	21,01	15-abr	7,15	5,36		19-jun	9,83	4,47	
10-feb	9,39	3,58	7,15	16-abr	6,26	2,68		20-jun	9,39	4,02	
11-feb	8,94	4,47	9,39	17-abr	9,83	6,26		21-jun	5,81	4,02	9,39
12-feb	16,54	5,81	21,46	18-abr	3,58	1,34		22-jun	6,71	3,13	8,94
13-feb	4,47	3,13		19-abr	3,13	0,45		23-jun	6,26	6,26	
14-feb	16,99	3,58	22,35	20-abr	3,58	1,34		24-jun	5,81	4,47	
15-feb	9,39	6,71		21-abr	3,13	1,34		25-jun	8,94	1,79	
16-feb	9,83	1,79	13,41	22-abr	3,58	1,79		26-jun	8,05	7,60	
17-feb	10,28	4,02		23-abr	3,13	0,89		27-jun	7,15	5,36	
18-feb	12,52	2,24	17,88	24-abr	3,13	0,45		28-jun	5,81	5,36	
19-feb	5,36	4,02		25-abr	7,15	2,24		29-jun	6,71	2,68	
20-feb	4,02	1,34		26-abr	9,39	3,58		30-jun	6,71	5,36	
21-feb	5,81	3,13		27-abr	7,15	2,68		01-jul	9,39	3,58	
22-feb	8,05	0,89		28-abr	3,58	0,00		02-jul	7,60	6,26	
23-feb	10,28	4,92	16,54	29-abr	3,13	1,34	6,26	03-jul	6,26	1,34	
24-feb	8,94	1,34		30-abr	10,73	1,34		04-jul	10,28	5,36	14,31
25-feb	10,73	7,60	12,96	01-may	8,94	3,58		05-jul	10,28	5,81	
26-feb	12,96	6,26	16,54	02-may	4,02	1,34		06-jul	7,15	6,71	
27-feb	7,15	5,81		03-may	8,05	0,89		07-jul	5,81	2,24	
28-feb	5,36	0,89		04-may	11,62	6,71		08-jul	11,62	2,68	
01-mar	12,96	3,13	16,54	05-may	12,96	7,60	17,88	09-jul	12,52	10,73	15,20
02-mar	12,96	4,02	15,20	06-may	11,62	8,49	16,99	10-jul	10,28	4,47	12,52
03-mar	10,73	9,39		07-may	12,96	8,49	19,22	11-jul	8,05	3,58	
04-mar	8,94	0,89		08-may	9,83	7,60		12-jul	8,94	7,15	
05-mar	11,18	5,81	13,86	09-may	4,47	3,58		13-jul	7,60	2,24	
06-mar	10,73	1,79		10-may	5,81	1,34		14-jul	9,83	5,81	

Día del mes	2007			Día del mes	2007			Día del mes	2007		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	12,52	6,26	16,09	18-sep	10,28	3,13		22-nov	6,71	3,13	
16-jul	8,94	5,81		19-sep	7,60	7,15		23-nov	8,05	5,36	
17-jul	6,71	3,13		20-sep	3,58	2,68		24-nov	9,83	5,36	
18-jul	9,39	8,05		21-sep	5,36	0,89		25-nov	11,62	9,39	15,20
19-jul	12,52	7,15	16,09	22-sep	4,47	1,79		26-nov	16,54	9,39	21,46
20-jul	11,18	10,28	16,54	23-sep	4,47	3,13		27-nov	13,41	12,96	20,56
21-jul	8,94	7,15		24-sep	6,71	0,00		28-nov	6,26	5,36	
22-jul	7,15	6,71		25-sep	10,28	5,81		29-nov	8,05	5,81	12,52
23-jul	8,05	4,02	8,94	26-sep	10,28	6,71	14,75	30-nov	5,81	4,02	
24-jul	9,39	3,58		27-sep	10,73	5,36	16,09	01-dic	8,94	0,89	
25-jul	5,81	4,92		28-sep	7,60	5,36		02-dic	7,15	5,81	
26-jul	6,71	2,24		29-sep	5,81	1,79		03-dic	11,18	2,68	16,09
27-jul	7,60	6,71		30-sep	6,26	1,34		04-dic	9,39	4,47	
28-jul	9,39	6,26		01-oct	5,36	3,13		05-dic	8,05	1,79	
29-jul	8,94	6,71		02-oct	4,47	1,79		06-dic	10,28	5,36	
30-jul	10,28	6,71		03-oct	5,36	3,58		07-dic	8,94	5,81	
31-jul	6,26	4,47		04-oct	3,58	0,89		08-dic	9,39	8,05	
01-ago	8,94	4,02		05-oct	5,36	0,89		09-dic	12,96	7,15	20,12
02-ago	9,39	8,49		06-oct	7,60	2,68		10-dic	10,28	4,47	
03-ago	8,94	8,49		07-oct	7,15	4,47		11-dic	12,96	6,71	
04-ago	4,02	3,13		08-oct	10,28	5,36		12-dic	12,52	11,62	
05-ago	9,39	1,79	11,18	09-oct	10,28	7,15		13-dic	4,02	3,58	
06-ago	10,73	3,13		10-oct	11,18	8,49		14-dic	4,47	0,45	
07-ago	10,28	8,94	14,31	11-oct	9,83	8,05		15-dic	7,60	3,58	
08-ago	10,28	10,28	13,41	12-oct	6,26	4,92		16-dic	2,68	0,00	
09-ago	9,83	5,81		13-oct	4,47	2,68		17-dic	4,47	0,45	
10-ago	8,94	7,15	12,52	14-oct	4,02	0,45		18-dic	6,26	5,36	
11-ago	4,47	4,47		15-oct	3,13	1,79		19-dic	5,36	1,79	
12-ago	8,94	3,13		16-oct	3,58	2,68		20-dic	4,02	2,68	
13-ago	7,60	6,71		17-oct	4,47	0,00		21-dic	4,47	2,24	
14-ago	6,71	1,34		18-oct	6,71	4,47		22-dic	3,58	0,89	
15-ago	11,18	1,79	9,83	19-oct	6,26	6,26		23-dic	4,47	2,24	
16-ago	9,83	7,15		20-oct	9,39	4,02	13,41	24-dic	3,58	1,79	
17-ago	8,05	7,60		21-oct	5,81	5,36		25-dic	3,13	0,89	
18-ago	7,15	6,26		22-oct	9,39	3,58		26-dic	5,81	2,24	
19-ago	10,73	7,60	13,86	23-oct	9,39	7,15		27-dic	4,02	3,13	
20-ago	9,83	7,15		24-oct	8,94	5,36		28-dic	2,68	1,79	
21-ago	13,41	4,02	16,99	25-oct	8,05	7,60		29-dic	4,02	0,00	
22-ago	8,94	7,60		26-oct	8,05	5,36		30-dic	10,73	3,13	
23-ago	8,94	4,92		27-oct	5,36	4,02		31-dic	6,71	6,26	
24-ago	6,26	4,47		28-oct	3,58	0,00					
25-ago	12,96	2,24	16,99	29-oct	10,73	3,58					
26-ago	5,81	3,58		30-oct	16,54	10,73	23,25				
27-ago	4,02	2,24		31-oct	13,41	7,60	17,43				
28-ago	9,83	0,45		01-nov	8,05	6,71					
29-ago	10,28	1,34		02-nov	6,26	5,81					
30-ago	12,96	9,83	18,33	03-nov	6,26	4,47					
31-ago	11,62	11,18	16,99	04-nov	6,71	4,47					
01-sep	7,15	7,15		05-nov	6,71	6,26					
02-sep	6,71	3,13		06-nov	12,96	5,36	16,54				
03-sep	10,73	7,15		07-nov	7,60	7,60					
04-sep	12,52	8,49	16,54	08-nov	10,73	6,26					
05-sep	8,94	8,94		09-nov	12,52	10,28	16,54				
06-sep	8,05	6,26		10-nov	9,39	7,15					
07-sep	10,28	7,60		11-nov	11,18	7,15					
08-sep	7,15	5,36		12-nov	12,52	8,49					
09-sep	9,39	3,58		13-nov	10,73	5,81					
10-sep	9,39	7,60		14-nov	11,62	8,05	14,31				
11-sep	9,83	6,26		15-nov	12,52	8,49	17,43				
12-sep	8,05	8,05		16-nov	11,62	8,94					
13-sep	4,47	2,24		17-nov	8,94	6,71					
14-sep	7,60	2,68		18-nov	3,58	2,24					
15-sep	7,15	6,26		19-nov	3,58	2,68					
16-sep	4,02	0,89		20-nov	7,15	4,02					
17-sep	7,15	3,58		21-nov	7,15	0,89					

Tabla A.3: Valores de viento en Zaragoza en 2007

Día del mes	2008			Día del mes	2008			Día del mes	2008		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	4,02	1,79		07-mar	19,22	9,83	25,03	11-may	8,05	1,34	
02-ene	5,36	4,02		08-mar	11,18	8,49		12-may	8,05	1,34	12,52
03-ene	6,71	4,02		09-mar	7,60	2,68		13-may	6,71	1,79	
04-ene	6,71	2,24		10-mar	11,62	2,24		14-may	8,05	2,24	18,33
05-ene	5,81	1,34		11-mar	5,36	3,13		15-may	5,36	3,58	
06-ene	7,60	0,00		12-mar	8,05	1,34		16-may	3,58	1,79	
07-ene	7,15	6,26		13-mar	6,26	6,26		17-may	9,83	1,79	
08-ene	3,58	0,45		14-mar	3,58	0,45		18-may	7,60	5,36	
09-ene	2,68	2,24		15-mar	10,73	2,24	11,18	19-may	8,94	5,81	
10-ene	4,02	0,45		16-mar	6,71	4,47		20-may	10,73	6,71	14,75
11-ene	12,52	3,13	12,52	17-mar	6,26	5,81		21-may	5,81	4,02	
12-ene	9,39	4,92		18-mar	11,18	4,47		22-may	6,71	4,02	
13-ene	5,36	3,13		19-mar	12,52	5,36	18,33	23-may	5,36	1,34	
14-ene	4,47	1,79		20-mar	11,18	10,28	13,86	24-may	7,15	2,24	
15-ene	8,94	1,34	11,62	21-mar	13,41	9,39	17,88	25-may	6,71	1,79	
16-ene	17,43	5,36	20,56	22-mar	12,52	4,92	14,31	26-may	4,02	1,79	
17-ene	5,81	3,58		23-mar	14,31	9,83	19,22	27-may	6,71	0,89	
18-ene	10,73	4,02		24-mar	13,41	6,26	17,43	28-may	7,60	0,45	12,96
19-ene	5,81	4,92		25-mar	10,73	4,47	14,31	29-may	5,36	0,89	
20-ene	1,79	0,45		26-mar	15,20	4,02	25,03	30-may	5,36	1,34	
21-ene	7,60	0,45		27-mar	8,05	4,92		31-may	4,02	1,34	
22-ene	11,18	5,36		28-mar	7,15	6,26		01-jun	8,05	0,89	
23-ene	8,05	7,60		29-mar	6,26	4,02		02-jun	8,05	3,58	
24-ene	5,36	0,00		30-mar	12,52	3,13	18,33	03-jun	7,60	4,92	
25-ene	4,47	3,13		31-mar	12,52	4,02	16,99	04-jun	7,60	4,92	
26-ene	0,89	0,00		01-abr	14,75	5,81	16,99	05-jun	8,94	4,02	
27-ene	3,13	0,89		02-abr	12,52	9,83		06-jun	12,52	8,49	16,99
28-ene	5,36	0,00		03-abr	12,52	8,49		07-jun	12,96	8,05	16,54
29-ene	2,68	0,45		04-abr	9,83	9,83		08-jun	10,73	9,83	
30-ene	9,83	0,00		05-abr	5,36	4,02		09-jun	8,94	8,05	
31-ene	10,73	9,39		06-abr	9,39	2,68		10-jun	4,02	3,58	
01-feb	3,58	0,45		07-abr	8,05	6,26		11-jun	8,05	1,79	
02-feb	9,83	2,24		08-abr	9,39	4,02		12-jun	10,28	6,71	14,75
03-feb	7,15	0,45		09-abr	8,05	3,13		13-jun	9,39	8,94	
04-feb	10,28	4,02	10,28	10-abr	10,28	2,24	14,75	14-jun	7,15	4,47	
05-feb	6,71	0,45		11-abr	12,52	9,39	16,54	15-jun	3,58	2,24	
06-feb	8,94	0,89		12-abr	8,05	7,60		16-jun	7,15	0,45	10,73
07-feb	4,02	2,68		13-abr	12,96	1,34		17-jun	10,73	3,58	12,96
08-feb	3,58	0,45		14-abr	8,05	4,47		18-jun	4,47	3,58	
09-feb	4,02	1,79		15-abr	6,71	5,36		19-jun	3,13	0,45	
10-feb	3,13	0,89		16-abr	5,36	0,89		20-jun	3,58	2,24	
11-feb	5,36	0,45		17-abr	12,96	2,68	16,09	21-jun	4,47	0,45	
12-feb	5,36	2,68		18-abr	16,54	1,34	20,12	22-jun	7,60	3,13	
13-feb	5,36	2,24		19-abr	7,15	5,36		23-jun	7,60	3,58	
14-feb	7,15	2,68		20-abr	9,39	2,24		24-jun	8,94	3,13	
15-feb	2,68	1,79		21-abr	12,96	6,26	13,41	25-jun	9,39	8,49	
16-feb	2,24	0,00		22-abr	6,26	3,58		26-jun	8,94	7,15	
17-feb	8,05	3,13		23-abr	8,94	4,02		27-jun	10,73	8,49	14,31
18-feb	4,47	4,47		24-abr	6,26	2,68		28-jun	8,94	8,94	
19-feb	6,71	2,24		25-abr	5,81	4,02		29-jun	6,71	4,02	
20-feb	4,02	3,58		26-abr	3,13	1,79		30-jun	7,60	7,15	
21-feb	2,68	0,45		27-abr	6,71	2,24		01-jul	9,39	4,92	
22-feb	2,68	0,89		28-abr	14,31	4,92		02-jul	9,83	4,02	
23-feb	5,36	0,45		29-abr	7,15	5,36	8,05	03-jul	10,73	7,60	
24-feb	5,81	1,34		30-abr	7,15	2,68		04-jul	4,47	3,13	
25-feb	3,58	3,58		01-may	6,26	3,13		05-jul	8,94	3,13	
26-feb	3,58	0,45		02-may	6,26	4,02		06-jul	9,83	8,05	
27-feb	4,47	3,58		03-may	4,47	3,13		07-jul	8,05	8,05	
28-feb*	4,02	1,79		04-may	9,83	2,24		08-jul	6,26	6,26	
01-mar	11,62	3,58	16,09	05-may	9,39	7,15		09-jul	5,36	3,13	
02-mar	6,71	6,71		06-may	6,26	4,47		10-jul	5,81	3,13	
03-mar	12,52	2,24	17,43	07-may	8,94	5,81		11-jul	16,09	3,58	21,46
04-mar	15,20	6,71	20,56	08-may	7,15	6,26		12-jul	10,73	5,81	
05-mar	16,54	9,83	23,25	09-may	6,71	3,58		13-jul	9,83	7,15	
06-mar	16,99	9,83	22,80	10-may	8,94	2,68	9,39	14-jul	7,60	5,81	

Día del mes	2008			Día del mes	2008			Día del mes	2008		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	6,26	5,36		18-sep	7,15	4,02		22-nov			
16-jul	5,81	4,02		19-sep	8,94	0,45		23-nov			
17-jul	8,05	6,26		20-sep	7,15	6,26		24-nov			
18-jul	9,83	8,94		21-sep	3,13	0,45		25-nov			
19-jul	5,36	3,58		22-sep	4,47	2,24		26-nov			
20-jul	11,62	3,13		23-sep	7,60	3,58		27-nov			
21-jul	12,52	10,28	15,20	24-sep	6,71	4,92		28-nov			
22-jul	11,62	9,83		25-sep	8,05	5,81	11,62	29-nov			
23-jul	5,81	2,68		26-sep	7,15	5,81		30-nov			
24-jul	6,71	2,24		27-sep	4,02	3,58		01-dic			
25-jul	5,36	5,36		28-sep	3,58	1,79		02-dic			
26-jul	7,15	2,68		29-sep	8,94	0,45		03-dic			
27-jul	6,71	4,47		30-sep	9,39	7,60		04-dic			
28-jul	9,83	3,13		01-oct				05-dic			
29-jul	9,39	8,05		02-oct				06-dic			
30-jul	6,71	4,47		03-oct				07-dic			
31-jul	4,02	2,24		04-oct				08-dic			
01-ago	9,83	4,02		05-oct				09-dic			
02-ago	7,60	5,81		06-oct				10-dic			
03-ago	5,36	4,92		07-oct				11-dic			
04-ago	6,26	3,13		08-oct				12-dic			
05-ago	8,94	4,92	13,86	09-oct				13-dic			
06-ago	6,71	2,24		10-oct				14-dic			
07-ago	10,28	3,58	15,20	11-oct				15-dic			
08-ago	10,28	9,83		12-oct				16-dic			
09-ago	9,39	8,05		13-oct				17-dic			
10-ago	3,58	2,68		14-oct				18-dic			
11-ago	5,36	4,47		15-oct				19-dic			
12-ago	8,05	2,24		16-oct				20-dic			
13-ago	7,60	6,71		17-oct				21-dic			
14-ago	6,71	4,92		18-oct				22-dic			
15-ago	9,83	5,36		19-oct				23-dic			
16-ago	4,47	2,68		20-oct				24-dic			
17-ago	4,02	1,34		21-oct				25-dic			
18-ago	7,15	2,24		22-oct				26-dic			
19-ago	10,73	3,58		23-oct				27-dic			
20-ago	9,83	9,39		24-oct				28-dic			
21-ago	6,26	0,45		25-oct				29-dic			
22-ago	9,39	3,13	12,52	26-oct				30-dic			
23-ago	7,15	6,71	9,83	27-oct				31-dic			
24-ago	5,81	3,13		28-oct							
25-ago	8,05	7,15		29-oct							
26-ago	7,15	7,15		30-oct							
27-ago	4,02	3,58		31-oct							
28-ago	3,58	1,79		01-nov							
29-ago	5,81	0,89		02-nov							
30-ago	5,36	3,13		03-nov							
31-ago	7,15	0,89		04-nov							
01-sep	6,26	4,92		05-nov							
02-sep	4,02	0,45		06-nov							
03-sep	6,71	3,58		07-nov							
04-sep	6,71	4,47		08-nov							
05-sep	9,39	2,68	8,94	09-nov							
06-sep	7,60	4,02		10-nov							
07-sep	4,47	3,13		11-nov							
08-sep	8,05	3,13		12-nov							
09-sep	9,39	5,36		13-nov							
10-sep	4,47	1,34		14-nov							
11-sep	11,62	1,79	14,75	15-nov							
12-sep	12,96	9,39	16,54	16-nov							
13-sep	9,83	5,36		17-nov							
14-sep	10,73	6,71		18-nov							
15-sep	11,18	8,05	16,09	19-nov							
16-sep	9,83	8,05		20-nov							
17-sep	5,36	0,89		21-nov							

* El día 29 de
Febrero se hizo
media con el día 28
para no alterar los
modelos

Tabla A.4: Valores de viento en Zaragoza en 2008

A.2.3. VALORES MÁS RELEVANTES DEL AÑO Y PROMEDIOS EN ZARAGOZA.

Año 2005- Zaragoza:

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 20m/s
Velocidad del viento	8.33m/s	4.72m/s	22.8m/s	
Velocidad de ráfaga	15.56m/s		27m/s	17 días/año

Tabla A. 5

Año 2006- Zaragoza:

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 20m/s
Velocidad del viento	7.78m/s	4.16m/s	19.7m/s	
Velocidad de ráfaga	15.3m/s		27.7m/s	7 días/año

Tabla A.6

Año 2007- Zaragoza:

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 20m/s
Velocidad del viento	8.05m/s	4.44m/s	20.1m/s	
Velocidad de ráfaga	15m/s		30.4m/s	14 días/año

Tabla A.7

Año 2008- Zaragoza:

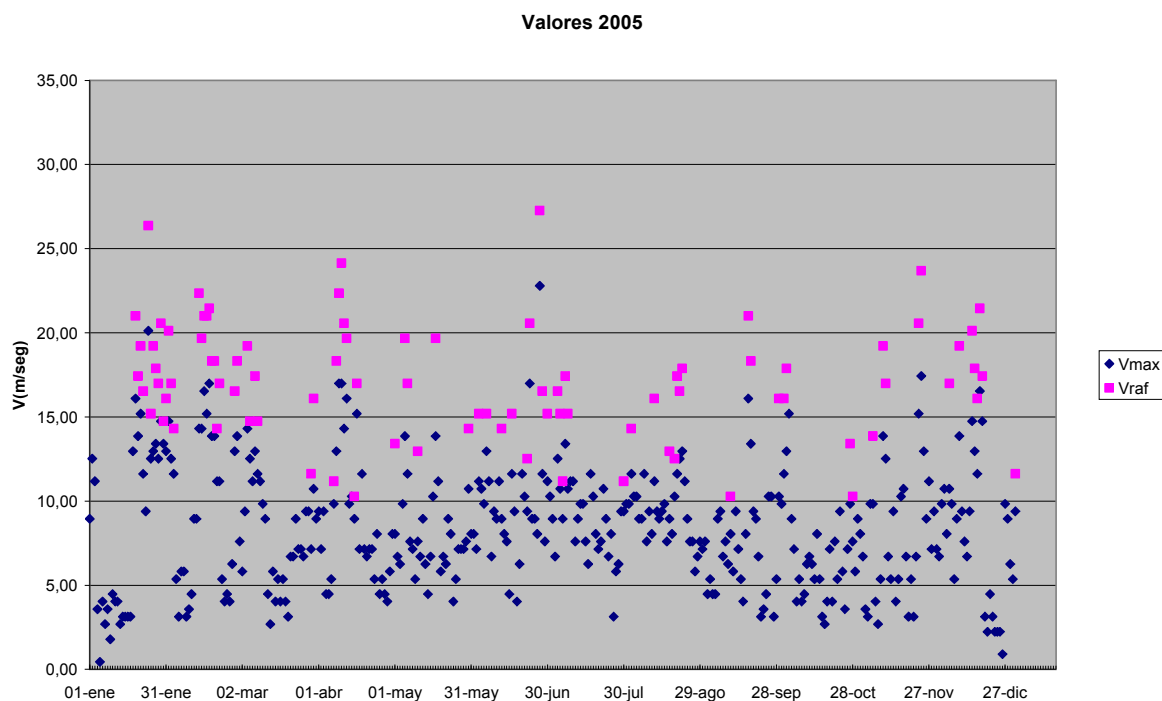
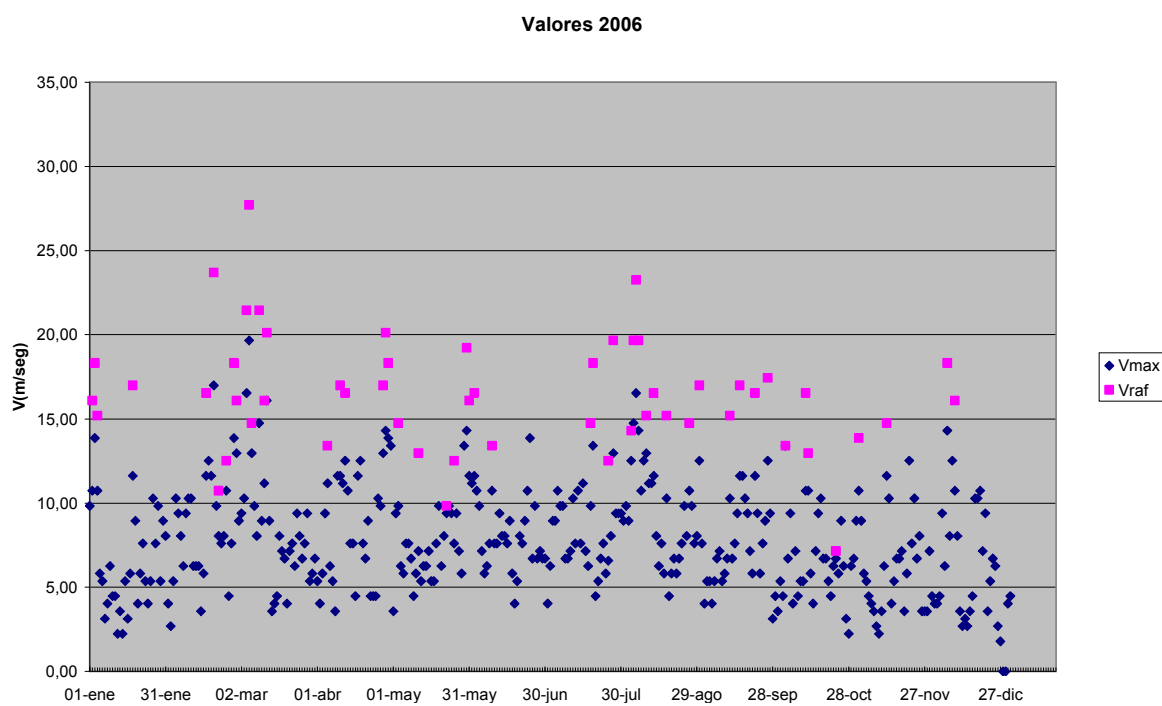
	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 20m/s
Velocidad del viento	7.88m/s	3.88m/s	19.2m/s	
Velocidad de ráfaga	14.44m/s		25.1m/s	8 días/año

Tabla A.8

Globales 2005-2008- Zaragoza:

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima periodo	Media de días que se superan los 20m/s por año
Velocidad del viento	8m/s	4.3m/s	22.8m/s	
Velocidad de ráfaga	15m/s		30.4m/s	11.5 días/año

Tabla A.9

A.2.4. GRÁFICAS DE VELOCIDADES MÁXIMAS DE VIENTO Y RÁFAGA.**Año 2005- Zaragoza:****Imagen A.3: Representación gráfica de la tabla 1. Zaragoza.****Año 2006- Zaragoza:****Imagen A.4: Representación gráfica de la tabla 2. Zaragoza.**

Año 2007- Zaragoza:

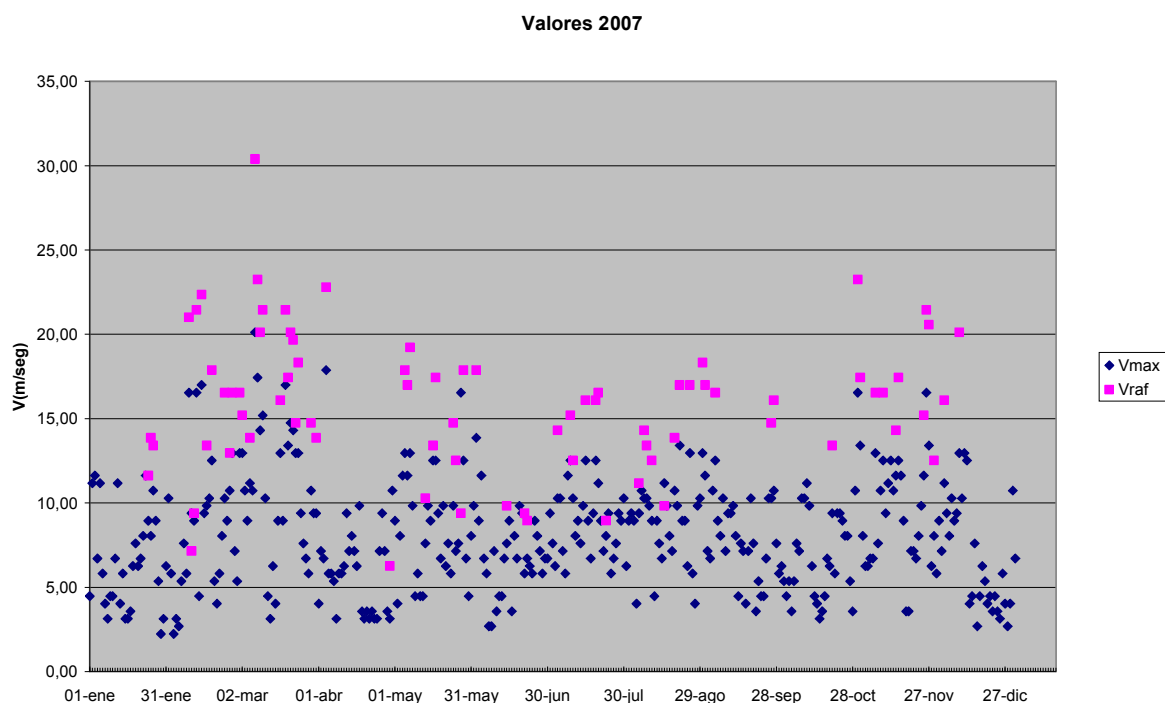


Imagen A.5: Representación gráfica de la tabla 3. Zaragoza.

Año 2008- Zaragoza:

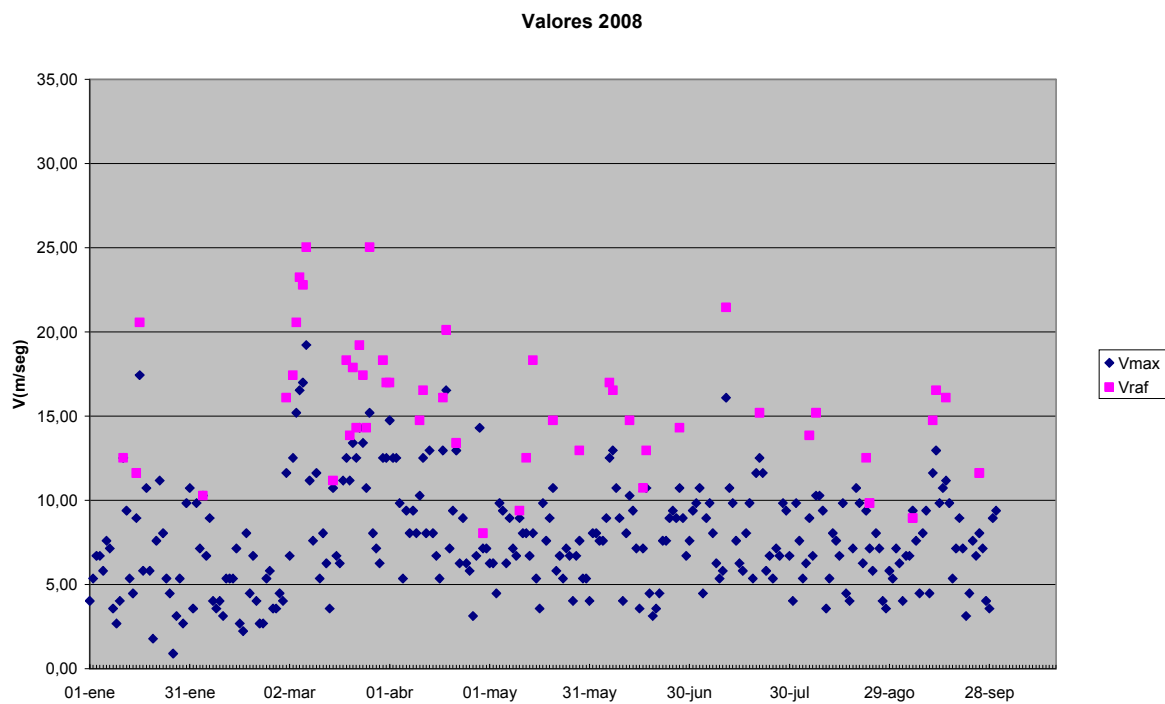


Imagen A.6: Representación gráfica de la tabla 4. Zaragoza.

A.2.5. GRÁFICAS DE DIRECCIÓN DEL VIENTO.

Año 2005- Zaragoza:

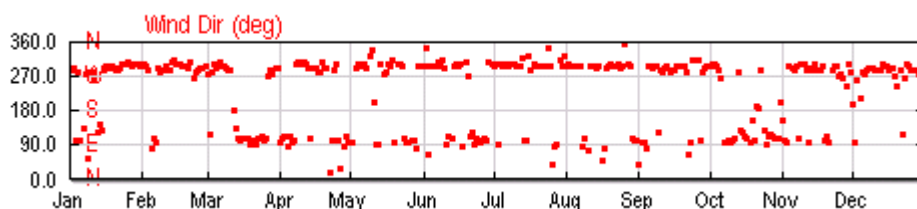


Imagen A.7: Gráfico de dirección media del viento en 2005. Zaragoza.

Año 2006- Zaragoza:

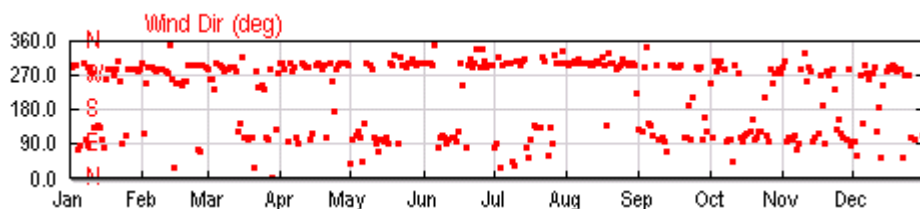


Imagen A.8: Gráfico de dirección media del viento en 2006. Zaragoza.

Año 2007- Zaragoza:

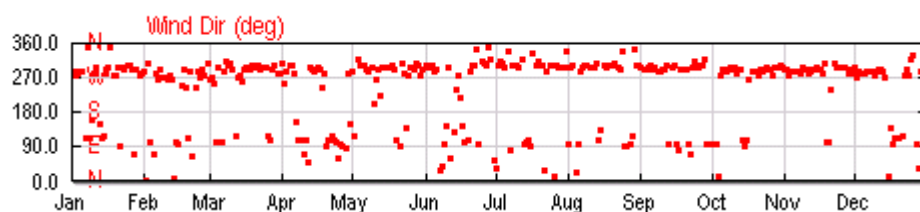


Imagen A.9: Gráfico de dirección media del viento en 2007. Zaragoza.

Año 2008- Zaragoza:

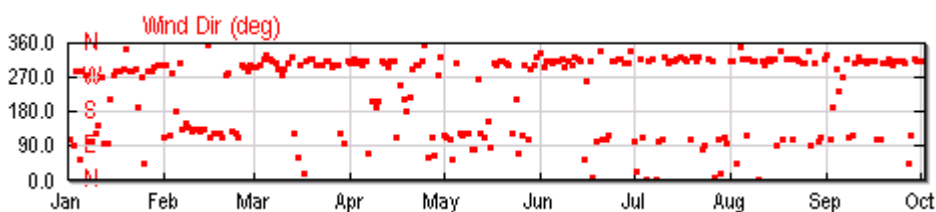


Imagen A.10: Gráfico de dirección media del viento en 2008. Zaragoza.

A.2.6. VALORACIÓN DE LOS DATOS.

Algunas conclusiones del muestreo:

- Las velocidades máximas de ráfaga pueden alcanzar los 30m/s un par de veces al año.
- Son habituales velocidades de ráfaga de más de 25m/s unos 11-12 días al año.
- Los vientos máximos se registran entre los meses de Enero a Marzo y en los meses de Junio a Septiembre.
- La dirección del viento queda claramente definida, se puede observar que hay dos claras franjas entre las que se reparten los vientos predominantes de todos los días, la correspondiente a los vientos de componente ONO (OesteNorOeste) que es la más densa y los vientos de componente ESE (Estesudeste) algo menos concurrida.
- Por lo tanto se puede decir que los vientos predominantes comparten dirección, soplan generalmente en la dirección ONO-ESE, y con más frecuencia en el sentido ONO.

A.3. DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LÉRIDA.

A.3.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.

Esta estación meteorológica está situada a las afueras de Lérida, a escasos 500m Suroeste de la línea de alta velocidad principal que une Madrid con Barcelona (No la que se desvía y entra en Lérida).



**Imagen A.11: En amarillo marcada la situación de la estación meteorológica y en azul las LAV.
Elaboración propia con Google Maps.**

A.3.2. DATOS RECOPIRADOS.

Día del mes	2005			Día del mes	2005			Día del mes	2005		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	1,79	0,45	2,24	07-mar	2,68	0,89	6,26	11-may	1,79	0,45	4,47
02-ene	1,34	0,00	3,13	08-mar	3,13	1,34	8,05	12-may	3,13	0,45	8,05
03-ene	2,24	0,45	4,47	09-mar	2,68	0,45	6,26	13-may	3,13	0,45	9,39
04-ene	0,89	0,00	2,24	10-mar	1,79	0,45	4,92	14-may	4,02	1,34	8,94
05-ene	1,34	0,45	2,68	11-mar	2,68	0,45	4,92	15-may	2,68	0,45	7,15
06-ene	1,79	0,45	3,13	12-mar	1,79	0,45	4,92	16-may	3,13	0,45	7,60
07-ene	0,89	0,45	2,68	13-mar	2,24	0,45	4,92	17-may	4,47	1,34	9,83
08-ene	0,89	0,45	2,68	14-mar	1,79	0,45	4,47	18-may	3,58	1,79	8,05
09-ene	0,89	0,00	2,68	15-mar	2,68	0,45	5,81	19-may	1,34	0,45	3,58
10-ene	1,79	0,45	3,58	16-mar	1,79	0,45	4,47	20-may	3,13	0,45	7,60
11-ene	1,34	0,45	2,68	17-mar	2,24	0,45	5,81	21-may	1,79	0,45	4,47
12-ene	1,79	0,45	3,58	18-mar	2,68	0,45	5,81	22-may	3,13	0,89	7,60
13-ene	1,34	0,45	3,13	19-mar	1,79	0,45	5,36	23-may	3,58	1,34	10,73
14-ene	1,34	0,45	3,58	20-mar	1,34	0,45	4,47	24-may	1,79	0,45	4,47
15-ene	2,24	0,45	3,58	21-mar	1,79	0,45	3,58	25-may	2,24	0,45	5,36
16-ene	1,34	0,45	2,68	22-mar	2,24	0,45	5,36	26-may	2,24	0,45	5,81
17-ene	1,79	0,45	4,47	23-mar	1,79	0,45	4,47	27-may	2,24	0,45	6,26
18-ene	7,15	2,24	18,33	24-mar	2,24	0,45	5,36	28-may	3,13	0,45	7,15
19-ene	5,81	3,13	12,52	25-mar	2,24	0,45	4,92	29-may	2,68	0,45	6,26
20-ene	3,58	1,34	7,60	26-mar	2,68	0,45	4,92	30-may	3,13	0,89	6,26
21-ene	4,47	1,79	8,94	27-mar	5,81	2,24	12,96	31-may	2,24	0,89	5,36
22-ene	2,68	0,45	5,81	28-mar	3,13	0,89	6,26	01-jun	2,68	0,89	5,81
23-ene	1,79	0,45	4,47	29-mar	5,36	1,34	9,83	02-jun	2,24	0,45	5,36
24-ene	5,36	1,34	9,83	30-mar	6,71	2,24	14,75	03-jun	3,13	0,45	7,60
25-ene	5,81	2,24	10,73	31-mar	3,13	1,34	8,05	04-jun	2,24	0,89	4,92
26-ene	5,81	1,79	12,96	01-abr	2,68	0,89	6,26	05-jun	2,68	0,89	5,36
27-ene	3,13	1,34	7,60	02-abr	1,34	0,45	4,92	06-jun	2,24	0,45	7,15
28-ene	2,68	0,45	5,36	03-abr	1,34	0,45	5,36	07-jun	2,24	0,45	5,36
29-ene	3,13	0,45	7,15	04-abr	2,68	0,45	6,26	08-jun	3,13	0,45	9,83
30-ene	3,58	1,34	7,15	05-abr	1,34	0,00	3,13	09-jun	2,68	0,45	6,26
31-ene	2,24	0,45	4,47	06-abr	3,13	0,45	7,60	10-jun	3,13	0,89	8,05
01-feb	3,58	0,89	7,15	07-abr	2,68	0,45	6,26	11-jun	3,58	0,45	9,39
02-feb	3,58	0,89	8,94	08-abr	8,05	3,13	16,09	12-jun	2,68	0,45	7,15
03-feb	2,24	0,45	4,92	09-abr	6,26	3,13	13,86	13-jun	3,13	0,45	7,60
04-feb	1,79	0,45	3,58	10-abr	4,92	2,68	12,96	14-jun	4,02	1,34	9,39
05-feb	0,89	0,00	3,13	11-abr	4,47	1,79	9,83	15-jun	2,24	0,45	8,05
06-feb	1,34	0,45	4,47	12-abr	3,13	0,89	7,15	16-jun	3,13	0,89	11,62
07-feb	1,34	0,45	5,81	13-abr	2,24	0,89	5,36	17-jun	1,79	0,45	5,81
08-feb	2,24	0,45	5,36	14-abr	3,58	0,45	8,49	18-jun	2,24	0,45	6,26
09-feb	1,79	0,45	5,36	15-abr	4,92	2,68	12,07	19-jun	2,68	0,45	7,15
10-feb	1,79	0,00	3,58	16-abr	6,71	3,58	16,09	20-jun	2,68	0,45	7,60
11-feb	2,24	0,45	4,47	17-abr	5,36	2,68	12,52	21-jun	2,68	0,45	7,60
12-feb	4,47	1,34	9,39	18-abr	4,92	1,79	11,18	22-jun	2,24	0,45	5,36
13-feb	10,28	4,47	19,67	19-abr	4,47	2,24	10,73	23-jun	4,47	0,45	12,07
14-feb	4,92	3,13	13,86	20-abr	6,26	3,13	14,31	24-jun	0,89	0,00	4,47
15-feb	4,47	0,89	10,73	21-abr	4,92	1,34	13,41	25-jun	2,24	0,45	5,36
16-feb	4,47	1,79	10,73	22-abr	2,24	0,45	5,36	26-jun	3,13	0,45	8,49
17-feb	3,58	1,34	7,15	23-abr	1,34	0,00	3,13	27-jun	7,15	0,45	18,33
18-feb	2,68	0,89	6,26	24-abr	3,13	0,89	8,05	28-jun	4,47	0,45	12,07
19-feb	8,05	1,79	16,09	25-abr	4,02	1,34	10,73	29-jun	4,02	1,34	9,39
20-feb	6,71	2,68	13,86	26-abr	2,68	0,45	6,26	30-jun	2,24	0,89	5,36
21-feb	3,58	1,79	8,94	27-abr	2,24	0,45	7,15	01-jul	3,58	1,34	7,60
22-feb	2,68	0,45	6,26	28-abr	1,79	0,45	4,47	02-jul	1,79	0,45	4,92
23-feb	3,13	0,45	6,26	29-abr	1,79	0,45	4,92	03-jul	2,68	0,45	7,60
24-feb	2,68	0,45	7,15	30-abr	2,68	0,45	7,60	04-jul	3,13	0,89	7,60
25-feb	2,24	0,45	4,47	01-may	3,13	0,45	8,05	05-jul	2,68	1,34	7,60
26-feb	2,68	0,45	7,15	02-may	1,79	0,45	5,36	06-jul	3,58	1,34	8,94
27-feb	3,13	0,89	7,60	03-may	4,47	0,89	9,39	07-jul	3,13	1,34	8,05
28-feb	4,02	1,79	8,49	04-may	3,58	0,89	8,94	08-jul	2,68	1,34	7,60
01-mar	2,68	0,89	5,36	05-may	4,92	2,24	12,07	09-jul	2,68	0,89	7,60
02-mar	1,34	0,45	3,13	06-may	3,58	1,79	7,60	10-jul	1,79	0,45	4,92
03-mar	5,36	1,79	12,52	07-may	1,79	0,45	4,92	11-jul	2,68	0,89	6,26
04-mar	3,58	1,34	8,05	08-may	2,68	0,45	7,60	12-jul	2,24	0,45	5,81
05-mar	8,49	3,58	18,78	09-may	4,02	0,45	9,39	13-jul	2,68	0,45	7,60
06-mar	3,58	1,34	9,83	10-may	1,79	0,45	4,47	14-jul	3,13	0,45	8,05

Día del mes	2005			Día del mes	2005			Día del mes	2005		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	3,13	0,45	7,60	18-sep	2,68	1,34	8,05	22-nov	0,89	0,00	3,13
16-jul	1,34	0,45	3,13	19-sep	3,13	0,89	8,05	23-nov	3,13	0,89	8,05
17-jul	1,79	0,45	4,47	20-sep	1,34	0,45	4,92	24-nov	3,58	1,79	8,49
18-jul	4,47	1,79	11,18	21-sep	1,34	0,00	3,13	25-nov	4,92	1,79	10,73
19-jul	3,13	1,34	8,05	22-sep	1,34	0,00	4,47	26-nov	4,92	2,24	11,62
20-jul	2,24	0,45	5,81	23-sep	2,24	0,45	5,36	27-nov	4,92	1,79	9,39
21-jul	2,68	0,45	5,81	24-sep	1,34	0,00	3,13	28-nov	1,79	0,00	4,92
22-jul	2,24	0,45	6,26	25-sep	2,24	0,45	5,36	29-nov	4,92	0,89	11,62
23-jul	1,79	0,45	4,92	26-sep	1,79	0,45	4,92	30-nov	2,68	0,45	5,36
24-jul	1,34	0,45	4,47	27-sep	1,79	0,00	4,47	01-dic	0,89	0,00	3,13
25-jul	2,24	0,45	7,60	28-sep	1,79	0,45	4,47	02-dic	1,34	0,45	3,58
26-jul	1,34	0,45	4,92	29-sep	2,68	0,45	7,60	03-dic	4,92	0,89	11,18
27-jul	2,24	0,45	8,05	30-sep	2,24	0,45	7,60	04-dic	1,34	0,00	2,68
28-jul	3,13	0,45	7,60	01-oct	2,68	0,45	6,26	05-dic	5,81	1,79	13,41
29-jul	2,24	0,45	6,26	02-oct	4,02	1,79	9,39	06-dic	5,36	1,79	11,18
30-jul	2,68	0,89	7,15	03-oct	3,13	0,89	7,15	07-dic	1,79	0,00	4,47
31-jul	2,24	0,45	5,81	04-oct	2,24	0,45	6,26	08-dic	2,24	0,45	7,60
01-ago	2,68	0,45	7,60	05-oct	1,79	0,45	4,92	09-dic	1,79	0,45	4,47
02-ago	2,24	0,89	6,26	06-oct	1,34	0,00	4,47	10-dic	1,79	0,45	5,36
03-ago	2,24	0,45	5,81	07-oct	1,34	0,45	4,92	11-dic	1,79	0,45	3,58
04-ago	2,24	0,45	5,36	08-oct	1,34	0,00	4,47	12-dic	1,79	0,45	4,47
05-ago	1,79	0,45	4,92	09-oct	1,34	0,00	3,13	13-dic	1,34	0,45	3,58
06-ago	2,24	0,45	4,92	10-oct	1,34	0,00	5,81	14-dic	1,34	0,45	3,13
07-ago	2,24	0,45	6,26	11-oct	1,34	0,45	4,92	15-dic	1,34	0,00	2,68
08-ago	3,13	0,45	8,94	12-oct	0,89	0,00	4,47	16-dic	0,89	0,00	2,24
09-ago	3,13	0,45	7,15	13-oct	1,34	0,45	5,36	17-dic	4,02	0,89	8,49
10-ago	5,36	0,45	13,86	14-oct	1,34	0,00	4,47	18-dic	1,79	0,00	3,13
11-ago	1,79	0,45	4,47	15-oct	2,24	0,00	5,36	19-dic	1,79	0,00	3,13
12-ago	1,79	0,45	5,36	16-oct	0,89	0,00	3,13	20-dic	1,34	0,00	2,68
13-ago	2,24	0,45	5,36	17-oct	0,45	0,00	2,24	21-dic	0,89	0,00	3,13
14-ago	2,24	0,45	7,15	18-oct	1,79	0,00	4,47	22-dic	0,89	0,00	2,24
15-ago	1,79	0,45	4,92	19-oct	1,34	0,00	3,13	23-dic	0,89	0,00	2,24
16-ago	2,68	0,45	7,15	20-oct	0,45	0,00	2,24	24-dic	0,45	0,00	2,68
17-ago	3,13	0,45	8,49	21-oct	2,24	0,00	5,36	25-dic	1,34	0,45	3,13
18-ago	2,24	0,45	5,36	22-oct	1,34	0,00	3,13	26-dic	0,89	0,00	2,68
19-ago	2,24	0,89	5,81	23-oct	1,79	0,00	4,47	27-dic	1,34	0,00	3,13
20-ago	6,26	2,24	14,75	24-oct	1,34	0,00	3,13	28-dic	0,89	0,00	2,68
21-ago	3,13	1,34	8,94	25-oct	0,89	0,00	2,68	29-dic	0,89	0,00	3,13
22-ago	3,13	1,34	8,49	26-oct	0,45	0,00	2,68	30-dic	1,34	0,45	3,58
23-ago	3,58	1,34	9,39	27-oct	0,89	0,00	4,47	31-dic	1,34	0,00	3,13
24-ago	2,24	0,45	5,81	28-oct	1,34	0,00	4,47				
25-ago	1,79	0,45	4,92	29-oct	1,79	0,00	3,58				
26-ago	0,89	0,00	4,47	30-oct	1,79	0,00	5,36				
27-ago	2,24	0,45	6,26	31-oct	1,34	0,45	3,58				
28-ago	2,24	0,45	7,60	01-nov	0,89	0,00	2,68				
29-ago	2,68	0,45	6,26	02-nov	1,34	0,00	3,13				
30-ago	1,79	0,45	4,92	03-nov	0,45	0,00	2,24				
31-ago	2,24	0,45	7,60	04-nov	3,58	0,89	8,05				
01-sep	1,79	0,45	5,36	05-nov	2,24	0,45	5,36				
02-sep	1,79	0,00	5,36	06-nov	1,79	0,00	4,47				
03-sep	1,79	0,45	6,26	07-nov	1,34	0,00	3,13				
04-sep	1,79	0,00	5,36	08-nov	0,89	0,00	3,58				
05-sep	1,79	0,45	4,92	09-nov	3,58	0,89	9,39				
06-sep	3,13	0,45	7,60	10-nov	2,24	0,45	5,36				
07-sep	3,13	0,45	7,60	11-nov	1,34	0,00	2,24				
08-sep	2,24	0,45	5,36	12-nov	0,89	0,00	2,68				
09-sep	1,34	0,00	3,58	13-nov	0,89	0,00	4,47				
10-sep	3,58	0,89	9,39	14-nov	2,68	0,45	7,15				
11-sep	2,68	0,89	7,60	15-nov	0,89	0,00	2,24				
12-sep	1,79	0,45	6,26	16-nov	2,24	0,45	5,81				
13-sep	1,79	0,45	4,47	17-nov	2,68	0,89	6,26				
14-sep	1,79	0,45	4,92	18-nov	1,34	0,00	3,13				
15-sep	2,24	0,45	5,36	19-nov	0,89	0,00	3,58				
16-sep	2,68	0,45	9,83	20-nov	1,79	0,45	5,36				
17-sep	3,58	0,89	9,39	21-nov	0,89	0,00	3,13				

Tabla A.10: Valores de viento en Lérida en 2005

Día del mes	2006			Día del mes	2006			Día del mes	2006		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene				07-mar	4,47	2,24	12,52	11-may	2,68	0,45	7,60
02-ene	4,92	2,24	12,52	08-mar	6,26	3,13	14,75	12-may	2,24	0,45	6,26
03-ene	2,68	1,34	5,81	09-mar	5,36	2,68	12,07	13-may	2,68	0,45	8,05
04-ene	1,79	0,00	4,47	10-mar	6,71	3,13	15,20	14-may	2,24	0,45	6,71
05-ene	1,79	0,45	3,13	11-mar	7,15	4,02	17,43	15-may	2,68	0,45	8,05
06-ene	1,79	0,45	5,36	12-mar	5,81	1,79	13,41	16-may	1,79	0,45	4,47
07-ene	1,79	0,45	5,81	13-mar	3,58	0,89	8,94	17-may	1,79	0,00	4,47
08-ene	1,79	0,45	5,36	14-mar	2,24	0,00	3,58	18-may	3,58	0,45	8,94
09-ene	0,45	0,00	2,68	15-mar	1,79	0,45	4,47	19-may	4,02	1,34	8,49
10-ene	1,79	0,45	4,47	16-mar	2,24	0,45	4,92	20-may	2,68	0,45	6,26
11-ene	2,24	0,45	5,81	17-mar	2,24	0,45	7,60	21-may	2,24	0,45	4,92
12-ene	0,89	0,00	2,68	18-mar	1,79	0,89	5,36	22-may	3,58	0,89	9,83
13-ene	1,34	0,00	2,68	19-mar	1,79	0,45	4,92	23-may	3,13	1,34	8,94
14-ene	1,79	0,45	3,13	20-mar	2,24	0,45	5,36	24-may	2,68	0,45	6,26
15-ene	0,89	0,00	2,68	21-mar	2,68	0,45	6,26	25-may	2,24	0,45	6,26
16-ene	1,34	0,00	3,58	22-mar	5,81	2,24	12,52	26-may	2,24	0,45	6,26
17-ene	1,79	0,45	4,47	23-mar	4,92	0,89	8,94	27-may	1,79	0,45	4,92
18-ene	2,24	0,45	6,26	24-mar	4,02	0,89	9,39	28-may	2,24	0,45	5,81
19-ene	1,34	0,45	4,47	25-mar	2,24	0,45	5,36	29-may	4,92	1,34	11,62
20-ene	1,79	0,45	3,13	26-mar	2,68	0,45	5,36	30-may	4,02	1,79	10,73
21-ene	1,34	0,45	3,58	27-mar	0,89	0,00	3,13	31-may	3,13	0,89	8,05
22-ene	1,34	0,00	3,13	28-mar	5,81	2,24	12,52	01-jun	2,68	0,89	7,15
23-ene	2,24	0,45	5,36	29-mar	3,13	0,45	7,60	02-jun	2,68	0,45	8,05
24-ene	0,89	0,00	3,13	30-mar	2,24	0,45	5,36	03-jun	3,13	0,89	6,26
25-ene	1,34	0,00	3,13	31-mar	1,79	0,00	4,47	04-jun	2,24	0,89	6,26
26-ene	0,89	0,00	2,68	01-abr	3,13	0,89	7,60	05-jun	2,24	0,45	5,81
27-ene	1,79	0,45	4,47	02-abr	4,02	0,89	9,39	06-jun	2,68	0,45	6,26
28-ene	3,58	0,89	7,60	03-abr	2,24	0,45	5,36	07-jun	2,24	0,45	4,92
29-ene	1,79	0,00	4,47	04-abr	3,13	0,45	7,60	08-jun	2,24	0,45	6,26
30-ene	1,79	0,45	3,58	05-abr	4,47	1,34	11,62	09-jun	2,24	0,45	6,26
31-ene	1,34	0,00	3,13	06-abr	4,47	0,89	9,83	10-jun	2,24	0,45	5,36
01-feb	1,34	0,00	3,13	07-abr	2,24	0,45	6,26	11-jun	2,68	0,45	8,49
02-feb	0,89	0,00	2,68	08-abr	1,34	0,00	3,58	12-jun	1,34	0,45	5,81
03-feb	0,89	0,00	2,24	09-abr	3,13	0,45	6,26	13-jun	2,24	0,45	6,26
04-feb	0,45	0,00	2,68	10-abr	7,15	2,68	14,31	14-jun	2,24	0,45	5,36
05-feb	1,79	0,45	4,47	11-abr	3,58	1,34	7,60	15-jun	1,79	0,45	5,36
06-feb	1,34	0,00	4,92	12-abr	2,24	0,45	5,36	16-jun	3,13	0,45	7,15
07-feb	1,34	0,00	3,13	13-abr	2,68	0,45	6,26	17-jun	1,79	0,45	4,92
08-feb	0,89	0,00	3,13	14-abr	2,24	0,00	7,15	18-jun	1,79	0,45	5,36
09-feb	2,24	0,00	5,36	15-abr	2,24	0,45	5,36	19-jun	2,24	0,00	5,36
10-feb	1,34	0,00	3,13	16-abr	1,79	0,00	4,47	20-jun	2,24	0,45	5,36
11-feb	2,24	0,45	5,36	17-abr	1,79	0,00	4,92	21-jun	1,79	0,89	5,36
12-feb	2,24	0,45	6,26	18-abr	4,02	1,34	7,60	22-jun	2,24	0,89	7,15
13-feb	1,34	0,00	3,13	19-abr	1,79	0,45	5,36	23-jun	3,58	0,45	11,18
14-feb	1,34	0,00	3,13	20-abr	2,24	0,45	8,05	24-jun	2,68	0,45	8,05
15-feb	0,89	0,00	2,68	21-abr	1,79	0,45	4,47	25-jun	2,68	0,89	8,49
16-feb	4,47	1,34	10,73	22-abr	1,34	0,45	5,81	26-jun	2,68	0,45	7,60
17-feb	4,02	1,34	8,49	23-abr	0,45	0,00	2,68	27-jun	4,02	0,45	8,05
18-feb	4,47	0,45	8,94	24-abr	1,34	0,00	4,92	28-jun	2,68	0,89	7,60
19-feb	6,71	1,79	13,86	25-abr	2,24	0,45	5,81	29-jun	2,24	0,89	5,81
20-feb	3,13	0,45	7,15	26-abr	2,68	0,89	6,26	30-jun	2,68	0,45	7,15
21-feb	2,24	0,45	4,92	27-abr	2,24	0,89	5,81	01-jul	1,79	0,45	6,26
22-feb	2,24	0,45	4,47	28-abr	4,02	1,79	8,49	02-jul	3,13	0,45	7,60
23-feb	3,13	0,89	6,26	29-abr	4,02	1,34	8,49	03-jul	1,79	0,45	6,26
24-feb	2,24	0,89	6,26	30-abr	2,24	0,89	6,26	04-jul	2,68	0,45	8,05
25-feb	2,24	0,45	5,36	01-may	2,68	0,45	7,15	05-jul	4,02	0,89	12,07
26-feb	2,68	0,89	8,94	02-may	3,13	0,45	7,60	06-jul	2,68	1,34	6,71
27-feb	4,92	1,79	11,18	03-may	2,24	0,45	7,60	07-jul	2,68	0,89	7,60
28-feb	3,13	1,34	7,60	04-may	1,79	0,45	4,47	08-jul	3,13	0,45	6,26
01-mar	3,13	0,45	6,26	05-may	2,24	0,45	6,26	09-jul	1,79	0,45	4,47
02-mar	4,92	1,34	10,73	06-may	1,79	0,45	5,81	10-jul	2,68	0,45	5,81
03-mar	3,58	1,34	9,39	07-may	2,68	0,45	7,60	11-jul	2,68	0,45	7,15
04-mar	1,79	0,45	5,81	08-may	4,47	1,34	11,62	12-jul	1,79	0,45	4,47
05-mar	4,02	1,79	9,39	09-may	4,47	0,89	6,26	13-jul	0,00	0,00	0,89
06-mar	7,60	3,58	16,99	10-may	2,24	0,45	8,05	14-jul	2,24	0,45	8,05

Día del mes	2006			Día del mes	2006			Día del mes	2006		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	3,13	0,45	8,94	18-sep	2,24	0,45	4,92	22-nov	5,81	3,13	12,96
16-jul	2,68	0,00	5,36	19-sep	1,34	0,45	3,58	23-nov	2,68	0,45	6,26
17-jul	2,68	0,45	7,60	20-sep	1,79	0,00	5,81	24-nov	1,34	0,00	3,58
18-jul	3,58	0,45	8,05	21-sep	1,34	0,45	5,36	25-nov	1,34	0,00	4,47
19-jul	2,68	0,45	5,81	22-sep	2,24	0,45	6,26	26-nov	1,34	0,00	3,13
20-jul	2,24	0,45	5,36	23-sep	0,89	0,00	3,58	27-nov	0,89	0,00	2,68
21-jul	1,79	0,45	5,36	24-sep	1,79	0,00	6,26	28-nov	0,89	0,00	2,68
22-jul	1,79	0,45	4,92	25-sep	4,92	1,79	10,73	29-nov	1,34	0,00	3,13
23-jul	2,24	0,45	5,81	26-sep	2,68	0,89	5,81	30-nov	0,89	0,00	2,24
24-jul	2,24	0,45	5,81	27-sep	0,89	0,00	2,68	01-dic	1,34	0,00	3,13
25-jul	1,79	0,45	5,36	28-sep	0,89	0,00	3,13	02-dic	0,89	0,00	3,13
26-jul	2,24	0,45	7,15	29-sep	0,89	0,00	3,13	03-dic	1,79	0,45	4,92
27-jul	3,58	0,45	7,15	30-sep	1,34	0,00	4,47	04-dic	1,79	0,00	3,13
28-jul	3,13	0,89	8,49	01-oct	2,68	0,45	6,71	05-dic	0,89	0,00	2,24
29-jul	2,24	0,89	5,81	02-oct	1,79	0,00	4,92	06-dic	4,02	1,79	11,62
30-jul	1,79	0,45	4,92	03-oct	5,36	1,79	12,52	07-dic	2,24	0,89	5,36
31-jul	1,79	0,45	4,92	04-oct	4,47	1,79	10,73	08-dic	4,47	0,89	9,83
01-ago	3,58	1,79	10,73	05-oct	2,24	0,89	5,36	09-dic	4,92	1,79	9,83
02-ago	3,13	0,89	8,49	06-oct	1,79	0,00	4,47	10-dic	0,89	0,00	3,13
03-ago	5,36	1,79	12,96	07-oct	1,79	0,00	4,47	11-dic	0,89	0,00	2,68
04-ago	2,68	0,89	7,60	08-oct	1,34	0,00	4,92	12-dic	1,79	0,45	3,13
05-ago	2,68	0,89	6,26	09-oct	1,34	0,00	4,92	13-dic	1,34	0,00	3,13
06-ago	2,68	0,89	7,15	10-oct	0,89	0,00	3,58	14-dic	1,34	0,45	3,13
07-ago	1,79	0,89	5,81	11-oct	3,58	0,45	8,49	15-dic	0,89	0,00	2,68
08-ago	2,24	0,45	5,81	12-oct	2,24	0,45	5,36	16-dic	0,89	0,00	2,68
09-ago	3,58	0,89	8,05	13-oct	1,79	0,45	3,58	17-dic	1,34	0,00	3,13
10-ago	2,24	0,45	5,36	14-oct	0,89	0,00	2,24	18-dic	1,79	0,45	5,36
11-ago	2,68	0,89	6,26	15-oct	0,45	0,00	3,13	19-dic	0,89	0,00	2,68
12-ago	4,92	2,24	12,52	16-oct	0,45	0,00	4,47	20-dic	2,24	0,45	4,47
13-ago	3,13	0,89	9,39	17-oct	0,89	0,45	5,36	21-dic	1,34	0,00	3,13
14-ago	1,79	0,45	4,92	18-oct	2,68	0,00	8,49	22-dic	2,24	0,45	3,58
15-ago	5,36	0,45	11,62	19-oct	1,34	0,00	4,92	23-dic	1,79	0,45	3,58
16-ago	1,34	0,00	3,58	20-oct	0,89	0,00	2,68	24-dic	1,34	0,00	2,68
17-ago	3,58	0,45	8,05	21-oct	1,34	0,00	3,58	25-dic	1,79	0,45	3,58
18-ago	0,89	0,00	3,13	22-oct	0,45	0,00	2,68	26-dic	0,89	0,00	2,24
19-ago				23-oct	0,89	0,00	4,92	27-dic	0,89	0,00	2,24
20-ago				24-oct	1,79	0,45	4,47	28-dic	0,89	0,00	2,24
21-ago				25-oct	0,89	0,00	4,92	29-dic	0,89	0,00	2,24
22-ago				26-oct	1,34	0,00	4,47	30-dic	0,89	0,00	2,68
23-ago				27-oct	2,24	0,00	4,92	31-dic	0,89	0,00	2,68
24-ago				28-oct	1,34	0,00	3,13				
25-ago				29-oct	0,89	0,00	3,58				
26-ago	2,68	1,34	8,05	30-oct	0,89	0,00	2,68				
27-ago	3,13	0,89	5,81	31-oct	1,34	0,00	3,13				
28-ago	4,02	0,89	10,73	01-nov	2,68	0,45	5,36				
29-ago	4,92	1,79	12,52	02-nov	1,34	0,45	5,36				
30-ago	3,58	1,34	8,49	03-nov	0,89	0,00	3,13				
31-ago	1,79	0,45	4,92	04-nov	1,34	0,45	5,36				
01-sep	1,79	0,45	5,36	05-nov	0,89	0,00	2,68				
02-sep	2,24	0,00	3,58	06-nov	0,89	0,00	2,68				
03-sep	1,79	0,45	4,47	07-nov	0,89	0,00	3,13				
04-sep	2,24	0,45	5,36	08-nov	0,89	0,00	4,47				
05-sep	2,24	0,45	8,49	09-nov	1,34	0,00	4,47				
06-sep	2,68	0,45	8,05	10-nov	0,89	0,00	2,68				
07-sep	1,34	0,00	3,58	11-nov	0,89	0,00	3,13				
08-sep	1,34	0,00	3,58	12-nov	0,89	0,00	3,13				
09-sep	2,24	0,45	5,81	13-nov	1,34	0,00	3,58				
10-sep	1,79	0,00	5,36	14-nov	0,89	0,00	2,24				
11-sep	2,68	0,45	8,49	15-nov	0,89	0,00	3,58				
12-sep	2,24	0,00	5,81	16-nov	1,34	0,45	4,47				
13-sep	1,79	0,00	4,92	17-nov	2,68	0,45	6,26				
14-sep	2,24	0,45	5,81	18-nov	1,34	0,00	3,58				
15-sep	4,02	2,24	9,83	19-nov	1,79	0,00	4,92				
16-sep	4,02	1,79	11,18	20-nov	3,13	0,45	8,49				
17-sep	2,68	0,89	7,60	21-nov	4,47	1,34	11,18				

Tabla A.11: Valores de viento en Lérida en 2006

Día del mes	2007			Día del mes	2007			Día del mes	2007		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	2,24	0,00	5,36	07-mar	6,71	1,34	16,54	11-may	3,13	0,89	8,05
02-ene	4,47	2,24	9,39	08-mar	4,92	2,68	11,62	12-may	2,24	0,45	8,05
03-ene	1,34	0,00	3,13	09-mar	3,13	1,34	6,26	13-may	3,13	0,45	8,05
04-ene	1,34	0,00	3,13	10-mar	4,47	1,34	9,39	14-may	5,81	2,68	13,41
05-ene	0,89	0,00	2,68	11-mar	3,13	1,34	6,26	15-may	3,58	1,34	7,60
06-ene	0,89	0,00	2,68	12-mar	1,79	0,45	4,47	16-may	4,92	1,79	11,18
07-ene	0,89	0,00	2,24	13-mar	1,34	0,45	3,58	17-may	3,58	1,34	8,49
08-ene	0,89	0,00	2,68	14-mar	1,79	0,45	4,47	18-may	2,68	0,89	8,49
09-ene	1,34	0,45	3,13	15-mar	1,34	0,00	3,58	19-may	2,68	0,00	5,36
10-ene	1,34	0,45	3,13	16-mar	2,24	0,45	6,26	20-may	1,34	0,45	5,36
11-ene	1,34	0,45	3,13	17-mar	3,13	1,34	7,15	21-may	1,34	0,45	6,26
12-ene	0,89	0,00	2,68	18-mar	3,58	0,89	7,60	22-may	1,79	0,45	4,47
13-ene	1,34	0,45	3,13	19-mar	8,49	4,47	17,88	23-may	2,24	0,00	5,81
14-ene	0,89	0,45	2,68	20-mar	6,26	4,02	13,41	24-may	2,24	0,45	7,15
15-ene	1,34	0,00	3,13	21-mar	4,47	1,79	8,49	25-may	3,13	0,45	8,94
16-ene	1,79	0,45	3,58	22-mar	5,81	2,68	13,41	26-may	4,47	1,79	10,73
17-ene	1,34	0,45	2,68	23-mar	6,26	2,24	13,86	27-may	4,92	1,79	11,62
18-ene	1,34	0,45	3,13	24-mar	7,15	3,13	13,41	28-may	7,60	4,47	17,43
19-ene	1,34	0,00	3,58	25-mar	2,68	0,45	5,36	29-may	6,26	2,68	13,86
20-ene	0,89	0,00	2,24	26-mar	2,68	0,89	5,81	30-may	2,68	0,45	5,36
21-ene	0,89	0,00	1,79	27-mar	2,24	0,45	4,47	31-may	4,47	1,34	11,62
22-ene	3,58	0,45	7,60	28-mar	1,34	0,00	4,47	01-jun	5,81	2,68	15,20
23-ene	7,60	3,13	17,88	29-mar	4,92	1,34	8,94	02-jun	3,13	0,89	7,60
24-ene	6,26	2,68	12,96	30-mar	5,81	2,24	12,07	03-jun	2,24	0,89	7,15
25-ene	1,79	0,00	3,13	31-mar	3,13	0,89	7,15	04-jun	2,68	0,45	6,26
26-ene	2,24	0,89	5,81	01-abr	2,24	0,89	5,36	05-jun	2,24	0,45	5,81
27-ene	2,68	0,45	5,81	02-abr	3,58	1,34	7,60	06-jun	1,79	0,45	6,26
28-ene	0,89	0,00	2,24	03-abr	2,68	0,89	5,36	07-jun	2,24	0,45	5,36
29-ene	2,24	0,00	4,47	04-abr	5,81	0,89	15,20	08-jun	1,79	0,45	5,36
30-ene	1,79	0,45	3,13	05-abr	1,79	0,45	4,47	09-jun	2,68	0,45	5,81
31-ene	0,89	0,00	2,68	06-abr	2,24	0,45	4,92	10-jun	2,68	0,45	6,26
01-feb	3,13	0,89	5,81	07-abr	1,34	0,45	4,47	11-jun	2,24	0,45	7,15
02-feb	1,34	0,00	3,13	08-abr	2,24	0,45	7,60	12-jun	3,58	0,45	9,39
03-feb	1,79	0,45	3,58	09-abr	1,34	0,00	3,58	13-jun	2,68	0,45	7,60
04-feb	0,89	0,00	2,68	10-abr	2,24	0,00	4,92	14-jun	2,68	0,45	5,81
05-feb	1,34	0,45	3,13	11-abr	1,34	0,00	3,13	15-jun	4,02	0,89	9,39
06-feb	1,34	0,45	3,13	12-abr	1,79	0,45	3,13	16-jun	2,24	0,45	4,92
07-feb	4,92	0,89	9,39	13-abr	1,34	0,00	3,13	17-jun	2,24	0,45	5,36
08-feb	1,79	0,45	3,13	14-abr	2,24	0,45	4,47	18-jun	0,89	0,00	3,58
09-feb	5,81	1,79	12,96	15-abr	2,68	0,45	6,26	19-jun	1,79	0,45	5,36
10-feb	5,81	1,79	14,75	16-abr	2,68	0,45	5,36	20-jun	3,13	0,89	7,15
11-feb	4,47	0,45	8,94	17-abr	1,34	0,00	4,47	21-jun	3,13	1,34	8,05
12-feb	6,26	1,79	15,20	18-abr	1,34	0,45	3,58	22-jun	3,13	1,34	7,60
13-feb	3,58	0,89	7,60	19-abr	2,68	0,45	4,92	23-jun	2,68	0,89	6,26
14-feb	6,26	1,79	13,86	20-abr	1,79	0,45	5,36	24-jun	3,13	0,45	8,05
15-feb	2,68	0,45	7,60	21-abr	2,24	0,45	5,81	25-jun	3,58	1,34	9,39
16-feb	2,24	0,45	4,47	22-abr	1,79	0,45	4,92	26-jun	4,02	2,24	9,39
17-feb	2,68	0,45	6,26	23-abr	1,34	0,45	3,58	27-jun	3,13	1,34	7,60
18-feb	2,68	0,89	5,36	24-abr	2,24	0,45	5,81	28-jun	2,68	0,89	7,60
19-feb	2,24	0,45	4,47	25-abr	2,68	0,45	7,60	29-jun	2,68	0,89	6,26
20-feb	1,34	0,00	2,24	26-abr	0,89	0,00	4,92	30-jun	2,68	0,45	7,60
21-feb	2,24	0,89	5,81	27-abr	1,34	0,00	5,81	01-jul	4,02	0,45	8,94
22-feb	3,58	0,45	5,81	28-abr	2,24	0,00	4,92	02-jul	3,13	0,89	8,05
23-feb	3,58	0,89	9,39	29-abr	1,79	0,00	4,92	03-jul	2,68	0,45	7,60
24-feb	4,92	1,34	11,62	30-abr	4,47	0,45	10,73	04-jul	6,26	3,13	14,31
25-feb	5,81	2,24	13,86	01-may	4,02	0,89	9,39	05-jul	3,13	0,89	8,94
26-feb	5,36	3,13	12,52	02-may	1,79	0,45	4,47	06-jul	2,24	0,45	5,81
27-feb	2,68	0,89	6,26	03-may	3,13	0,45	6,26	07-jul	3,13	0,45	8,05
28-feb	5,36	1,34	11,62	04-may	2,24	0,45	5,36	08-jul	3,13	0,89	7,60
01-mar	4,47	1,34	8,94	05-may	4,02	1,34	8,49	09-jul	6,71	2,68	13,41
02-mar	4,92	1,34	9,39	06-may	4,47	1,34	9,39	10-jul	4,92	2,24	13,41
03-mar	4,92	1,34	9,83	07-may	3,58	1,34	8,49	11-jul	3,13	1,34	8,49
04-mar	2,24	0,45	8,05	08-may	4,02	1,34	7,60	12-jul	0,89	0,45	3,58
05-mar	5,36	1,79	11,18	09-may	4,47	0,89	8,94	13-jul	3,13	0,45	8,05
06-mar	3,13	0,45	9,39	10-may	2,24	0,45	5,36	14-jul	2,68	0,45	8,49

Día del mes	2007			Día del mes	2007			Día del mes	2007		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	1,34	0,45	7,60	18-sep	3,58	1,34	7,60	22-nov	1,79	0,45	4,02
16-jul	2,24	0,45	5,36	19-sep	2,24	0,89	5,36	23-nov	1,79	0,45	4,47
17-jul	2,24	0,45	5,81	20-sep	1,79	0,45	5,36	24-nov	2,24	0,45	5,36
18-jul	3,58	0,89	8,05	21-sep	1,79	0,00	6,26	25-nov	3,13	0,45	8,49
19-jul	1,79	0,45	4,92	22-sep	1,34	0,00	4,47	26-nov	1,34	0,00	3,13
20-jul	2,68	0,89	6,26	23-sep	1,34	0,45	4,47	27-nov	2,24	0,00	4,92
21-jul	1,79	0,89	4,47	24-sep	2,24	0,45	5,36	28-nov	1,34	0,00	3,13
22-jul	2,24	0,45	5,36	25-sep	3,58	1,34	9,83	29-nov	1,79	0,00	3,13
23-jul	3,58	0,45	8,49	26-sep	4,92	2,24	13,41	30-nov	0,89	0,00	2,24
24-jul	4,02	1,79	9,39	27-sep	4,92	2,24	12,52	01-dic	0,89	0,00	2,24
25-jul	1,79	0,45	5,36	28-sep	1,79	0,45	5,36	02-dic	0,89	0,00	2,68
26-jul	2,24	0,45	5,36	29-sep	0,89	0,00	3,13	03-dic	6,26	2,24	16,99
27-jul	1,79	0,45	5,36	30-sep	0,89	0,00	3,13	04-dic	2,68	0,89	6,26
28-jul	2,24	0,89	5,36	01-oct	1,34	0,00	4,47	05-dic	2,24	0,45	4,92
29-jul	2,24	0,89	5,36	02-oct	0,89	0,00	2,68	06-dic	2,24	0,00	4,47
30-jul	3,13	0,89	6,26	03-oct	0,89	0,00	3,58	07-dic	5,36	1,34	12,07
31-jul	2,24	0,45	7,15	04-oct	2,24	0,00	6,26	08-dic	6,26	2,24	12,07
01-ago	2,68	0,45	8,94	05-oct	2,24	0,45	4,47	09-dic	6,26	2,24	13,41
02-ago	2,24	0,89	5,81	06-oct	1,34	0,00	4,47	10-dic	6,26	4,02	15,65
03-ago	1,79	0,89	5,81	07-oct	1,79	0,45	3,58	11-dic	3,58	1,79	8,49
04-ago	2,24	0,45	6,26	08-oct	2,24	0,45	4,47	12-dic	1,79	0,45	4,47
05-ago	4,02	0,45	11,62	09-oct	2,68	0,89	7,15	13-dic	0,89	0,00	2,24
06-ago	1,79	0,45	7,15	10-oct	1,79	0,89	4,92	14-dic	1,79	0,45	4,47
07-ago	1,79	0,45	4,92	11-oct	1,79	0,45	5,36	15-dic	1,34	0,45	4,47
08-ago	4,02	1,79	8,94	12-oct	1,34	0,45	4,47	16-dic	1,79	0,45	4,47
09-ago	3,13	0,89	7,15	13-oct	1,79	0,45	4,47	17-dic	1,79	0,45	4,92
10-ago	2,24	0,45	5,36	14-oct	0,89	0,00	4,47	18-dic	2,24	0,45	6,26
11-ago	1,34	0,45	4,47	15-oct	0,89	0,00	3,58	19-dic	1,79	0,45	4,47
12-ago	2,68	0,45	6,26	16-oct	0,89	0,00	3,13	20-dic	2,68	1,79	8,05
13-ago	1,34	0,45	4,92	17-oct	0,89	0,00	2,68	21-dic	3,13	2,24	8,49
14-ago	1,34	0,45	4,47	18-oct	1,79	0,45	4,47	22-dic	1,79	0,00	4,47
15-ago	1,79	0,00	5,81	19-oct	2,24	0,45	5,36	23-dic	2,24	0,45	4,92
16-ago	3,58	1,34	8,05	20-oct	1,34	0,00	4,47	24-dic	1,79	0,00	3,58
17-ago	2,24	0,89	6,26	21-oct	1,79	0,45	5,36	25-dic	0,89	0,45	3,13
18-ago	1,79	0,45	4,47	22-oct	1,34	0,00	4,47	26-dic	2,24	0,45	4,02
19-ago	3,58	1,34	8,94	23-oct	2,68	0,45	5,81	27-dic	1,34	0,00	3,13
20-ago	3,58	1,79	9,83	24-oct	1,79	0,45	5,36	28-dic	1,34	0,45	3,58
21-ago	5,81	3,13	11,62	25-oct	2,68	0,89	7,60	29-dic	1,34	0,45	3,13
22-ago	2,24	0,89	6,26	26-oct	1,79	0,45	4,92	30-dic	1,34	0,45	2,68
23-ago	4,02	0,89	7,60	27-oct	1,34	0,00	4,47	31-dic	0,89	0,00	2,68
24-ago	1,79	0,45	4,92	28-oct	1,34	0,00	3,58				
25-ago	1,34	0,00	4,92	29-oct	1,34	0,00	4,47				
26-ago	2,24	0,45	4,92	30-oct	3,58	0,89	7,60				
27-ago	1,34	0,00	3,58	31-oct	3,13	1,34	8,49				
28-ago	3,13	0,45	8,94	01-nov	3,13	0,89	7,15				
29-ago	3,58	0,89	8,94	02-nov	1,34	0,00	3,58				
30-ago	3,58	1,34	8,94	03-nov	1,34	0,00	4,47				
31-ago	2,68	0,89	6,26	04-nov	1,34	0,00	3,13				
01-sep	1,79	0,45	4,92	05-nov	0,89	0,00	3,13				
02-sep	1,34	0,00	4,47	06-nov	1,79	0,45	4,92				
03-sep	2,68	0,89	7,15	07-nov	2,24	0,00	4,47				
04-sep	2,24	0,89	6,26	08-nov	2,68	0,00	4,92				
05-sep	2,24	0,45	5,36	09-nov	2,68	0,45	6,26				
06-sep	2,68	0,45	5,81	10-nov	2,68	0,45	5,36				
07-sep	2,24	0,45	5,36	11-nov	1,79	0,00	4,47				
08-sep	1,79	0,45	4,47	12-nov	1,79	0,00	3,58				
09-sep	1,79	0,45	4,47	13-nov	1,79	0,45	5,36				
10-sep	1,79	0,45	4,92	14-nov	4,92	0,89	12,07				
11-sep	2,24	0,45	5,81	15-nov	4,02	0,89	9,39				
12-sep	1,79	0,45	4,47	16-nov	3,13	1,34	6,26				
13-sep	1,79	0,00	5,36	17-nov	1,34	0,00	3,13				
14-sep	1,79	0,45	5,36	18-nov	0,89	0,00	2,68				
15-sep	2,24	0,45	5,36	19-nov	0,89	0,00	2,24				
16-sep	2,24	0,45	5,36	20-nov	1,79	0,45	5,36				
17-sep	0,45	0,00	2,24	21-nov	1,79	0,00	5,36				

Tabla A.12: Valores de viento en Lérida en 2007

Día del mes	2008			Día del mes	2008			Día del mes	2008		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
01-ene	0,89	0,00	3,13	07-mar	4,47	2,24	9,83	11-may	1,34	0,45	5,81
02-ene	1,34	0,45	4,47	08-mar	3,13	0,89	8,05	12-may	1,79	0,45	5,81
03-ene	2,68	0,89	5,36	09-mar	6,26	0,89	12,96	13-may	2,24	0,45	7,15
04-ene	1,79	0,45	3,13	10-mar	2,68	0,45	7,15	14-may	1,34	0,00	3,58
05-ene	1,34	0,00	3,13	11-mar	6,71	3,13	14,31	15-may	1,34	0,45	4,02
06-ene	1,34	0,00	3,13	12-mar	5,36	1,79	11,62	16-may	2,24	0,45	5,36
07-ene	0,89	0,00	2,24	13-mar	1,79	0,45	5,36	17-may	3,13	0,45	7,60
08-ene	0,89	0,00	2,24	14-mar	1,79	0,45	3,58	18-may	4,02	0,89	10,73
09-ene	0,89	0,00	3,13	15-mar	4,92	0,89	11,18	19-may	3,58	0,89	7,60
10-ene	0,89	0,00	2,24	16-mar	5,36	2,68	13,41	20-may	3,58	1,34	8,05
11-ene	5,36	1,34	16,99	17-mar	2,24	0,45	5,36	21-may	2,68	0,89	7,15
12-ene	8,05	2,68	12,96	18-mar	4,47	1,79	11,62	22-may	2,68	0,45	6,26
13-ene	1,34	0,00	4,02	19-mar	4,02	1,34	8,49	23-may	4,47	0,45	8,94
14-ene	1,79	0,45	4,47	20-mar	3,13	1,34	7,15	24-may	5,36	0,45	11,62
15-ene	1,79	0,45	3,13	21-mar	7,60	3,58	16,99	25-may	1,34	0,00	4,92
16-ene	6,26	1,79	14,75	22-mar	7,60	3,58	13,41	26-may	1,34	0,00	3,13
17-ene	4,02	1,34	8,94	23-mar	6,71	3,13	15,20	27-may	3,58	0,45	6,26
18-ene	1,79	0,45	4,92	24-mar	8,05	4,92	16,09	28-may	1,34	0,00	4,47
19-ene	0,89	0,00	2,68	25-mar	6,71	3,58	14,75	29-may	2,68	0,89	7,15
20-ene	0,89	0,00	2,68	26-mar	8,94	2,68	14,75	30-may	1,79	0,45	5,36
21-ene	1,79	0,45	3,13	27-mar	7,15	1,79	14,31	31-may	0,89	0,00	4,47
22-ene	1,79	0,00	3,58	28-mar	5,36	1,79	10,73	01-jun	5,81	0,00	9,39
23-ene	0,89	0,45	2,24	29-mar	3,13	0,45	7,60	02-jun	2,68	0,45	6,71
24-ene	1,79	0,45	3,13	30-mar	5,81	1,34	13,86	03-jun	4,02	0,89	7,60
25-ene	1,79	0,45	3,58	31-mar	6,71	3,58	14,31	04-jun	3,13	0,89	6,26
26-ene	1,79	0,00	3,13	01-abr	4,47	1,79	8,49	05-jun	4,02	0,89	8,94
27-ene	1,34	0,00	2,68	02-abr	3,13	0,89	7,60	06-jun	4,92	1,79	9,83
28-ene	1,79	0,45	3,13	03-abr	4,02	1,34	7,15	07-jun	2,68	1,34	10,73
29-ene	1,79	0,45	3,13	04-abr	3,58	0,89	8,49	08-jun	2,24	0,89	5,36
30-ene	1,34	0,00	2,68	05-abr	2,68	0,45	5,81	09-jun	3,13	0,89	7,60
31-ene	2,24	0,45	4,47	06-abr	3,58	0,89	8,49	10-jun	1,79	0,45	4,47
01-feb	2,24	0,00	4,47	07-abr	2,68	0,45	6,26	11-jun	3,13	0,89	7,15
02-feb	1,34	0,00	3,13	08-abr	3,13	0,45	7,15	12-jun	3,13	1,34	7,15
03-feb	2,24	0,45	7,60	09-abr	1,79	0,00	3,58	13-jun	4,92	2,24	11,62
04-feb	5,36	1,79	11,62	10-abr	4,92	0,45	12,96	14-jun	4,47	1,79	8,94
05-feb	1,79	0,00	3,58	11-abr	4,47	1,34	10,73	15-jun	1,79	0,45	4,02
06-feb	1,34	0,00	2,68	12-abr	4,02	1,34	8,94	16-jun	5,81	0,45	10,73
07-feb	1,34	0,00	2,68	13-abr	3,58	0,89	8,05	17-jun	3,58	1,34	8,05
08-feb	1,34	0,00	2,68	14-abr	4,92	2,24	11,18	18-jun	1,79	0,45	5,81
09-feb	1,34	0,00	3,58	15-abr	2,68	0,45	6,26	19-jun	2,24	0,45	5,36
10-feb	1,34	0,00	3,13	16-abr	3,13	0,45	7,60	20-jun	2,24	0,45	6,26
11-feb	1,34	0,45	4,47	17-abr	4,92	0,89	17,88	21-jun	3,13	0,45	8,05
12-feb	2,24	0,45	4,47	18-abr	8,94	0,89	16,54	22-jun	2,68	0,45	5,81
13-feb	1,79	0,45	4,47	19-abr	2,24	0,45	6,26	23-jun	1,34	0,00	5,81
14-feb	2,24	0,89	5,36	20-abr	3,13	0,45	7,60	24-jun	2,24	0,45	5,36
15-feb	1,79	0,45	4,47	21-abr	5,81	2,68	14,31	25-jun	2,24	0,89	5,81
16-feb	1,34	0,45	3,13	22-abr	5,36	2,68	12,52	26-jun	2,24	0,45	6,26
17-feb	2,24	0,45	5,36	23-abr	4,02	1,34	9,83	27-jun	2,68	0,89	7,60
18-feb	2,24	0,89	5,36	24-abr	3,58	0,89	10,73	28-jun	1,79	0,89	4,92
19-feb	2,68	0,89	5,81	25-abr	2,68	0,45	3,58	29-jun	2,24	0,45	4,47
20-feb	1,79	0,45	3,58	26-abr	1,79	0,45	5,36	30-jun	1,79	0,45	6,26
21-feb	1,79	0,45	3,58	27-abr	2,68	0,45	5,81	01-jul	2,24	0,00	8,05
22-feb	1,79	0,45	4,47	28-abr	3,58	0,45	7,60	02-jul	1,34	0,00	4,92
23-feb	1,34	0,45	3,58	29-abr	2,68	0,45	6,26	03-jul	4,47	1,79	9,83
24-feb	1,79	0,45	4,47	30-abr	4,92	1,79	12,07	04-jul	2,68	0,89	6,26
25-feb	1,79	0,45	3,58	01-may	2,68	0,45	7,60	05-jul	2,24	0,45	4,92
26-feb	2,24	0,00	4,47	02-may	2,68	0,45	8,49	06-jul	3,13	0,89	8,05
27-feb	1,34	0,00	3,58	03-may	2,24	0,45	7,15	07-jul	2,68	1,34	7,60
28-feb*	1,34	0,45	3,13	04-may	2,68	0,45	7,60	08-jul	2,24	0,89	5,81
01-mar	4,47	0,89	8,49	05-may	3,13	0,89	6,26	09-jul	2,68	0,45	7,15
02-mar	1,79	0,00	3,58	06-may	3,13	0,45	8,05	10-jul	2,24	0,45	5,81
03-mar	5,81	1,79	11,62	07-may	2,24	0,45	5,81	11-jul	5,81	0,45	13,41
04-mar	8,05	4,02	16,99	08-may	1,79	0,45	4,92	12-jul	5,36	0,89	8,94
05-mar	8,05	3,58	14,31	09-may	1,79	0,45	5,81	13-jul	4,02	1,79	7,60
06-mar	5,81	2,24	13,41	10-may	1,79	0,45	7,60	14-jul	2,24	0,89	4,92

Día del mes	2008			Día del mes	2008			Día del mes	2008		
	Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)		Velocidad del viento Máx. (m/s)	Med. (m/s)	Ráfaga Máx. (m/s)
15-jul	2,24	0,45	5,36	18-sep	1,79	0,00	6,26	22-nov			
16-jul	2,68	0,45	5,36	19-sep	2,24	0,45	4,92	23-nov			
17-jul	4,02	0,45	4,92	20-sep	1,79	0,45	4,47	24-nov			
18-jul	4,02	0,45	7,15	21-sep	1,79	0,45	5,36	25-nov			
19-jul	1,79	0,45	5,36	22-sep	1,79	0,45	4,47	26-nov			
20-jul	3,13	0,45	7,15	23-sep	1,79	0,00	3,13	27-nov			
21-jul	2,68	0,89	7,15	24-sep	1,79	0,45	4,47	28-nov			
22-jul	2,24	0,89	5,81	25-sep	1,79	0,45	4,92	29-nov			
23-jul	2,24	0,45	5,36	26-sep	1,79	0,45	4,92	30-nov			
24-jul	2,68	0,45	7,15	27-sep	2,24	0,00	5,36	01-dic			
25-jul	2,68	0,45	5,81	28-sep	1,34	0,00	4,47	02-dic			
26-jul	2,68	0,45	6,26	29-sep	1,79	0,00	4,47	03-dic			
27-jul	2,24	0,45	7,15	30-sep	2,24	0,45	5,36	04-dic			
28-jul	2,24	0,45	6,26	01-oct				05-dic			
29-jul	2,68	0,45	6,26	02-oct				06-dic			
30-jul	3,13	0,45	8,05	03-oct				07-dic			
31-jul	2,24	0,45	7,15	04-oct				08-dic			
01-ago	3,13	0,00	7,15	05-oct				09-dic			
02-ago	2,24	0,89	5,81	06-oct				10-dic			
03-ago	2,24	0,45	5,81	07-oct				11-dic			
04-ago	3,13	0,45	7,60	08-oct				12-dic			
05-ago	4,92	0,45	13,86	09-oct				13-dic			
06-ago	2,24	0,45	5,81	10-oct				14-dic			
07-ago	2,24	0,45	5,36	11-oct				15-dic			
08-ago	4,02	1,79	8,49	12-oct				16-dic			
09-ago	2,24	0,89	5,36	13-oct				17-dic			
10-ago	2,68	0,45	7,60	14-oct				18-dic			
11-ago	1,79	0,45	5,36	15-oct				19-dic			
12-ago	3,13	0,89	8,05	16-oct				20-dic			
13-ago	3,58	0,89	8,94	17-oct				21-dic			
14-ago	4,92	0,45	11,62	18-oct				22-dic			
15-ago	6,71	3,13	13,86	19-oct				23-dic			
16-ago	1,34	0,45	3,58	20-oct				24-dic			
17-ago	2,24	0,45	5,36	21-oct				25-dic			
18-ago	2,68	0,45	7,15	22-oct				26-dic			
19-ago	2,68	0,45	4,92	23-oct				27-dic			
20-ago	3,13	0,89	7,60	24-oct				28-dic			
21-ago	2,24	0,00	5,36	25-oct				29-dic			
22-ago	4,92	0,89	12,52	26-oct				30-dic			
23-ago	2,68	0,89	7,15	27-oct				31-dic			
24-ago	2,24	0,45	5,81	28-oct							
25-ago	2,68	0,45	6,26	29-oct							
26-ago	2,24	0,45	7,60	30-oct							
27-ago	4,02	0,45	8,05	31-oct							
28-ago	2,24	0,45	5,36	01-nov							
29-ago	2,68	0,45	6,26	02-nov							
30-ago	1,79	0,00	5,36	03-nov							
31-ago	2,68	0,45	4,92	04-nov							
01-sep	2,24	0,45	4,92	05-nov							
02-sep	2,68	0,45	6,26	06-nov							
03-sep	2,68	0,45	5,81	07-nov							
04-sep	1,79	0,45	4,92	08-nov							
05-sep	1,34	0,00	4,47	09-nov							
06-sep	3,13	0,89	7,15	10-nov							
07-sep	1,79	0,45	3,58	11-nov							
08-sep	2,68	0,45	7,15	12-nov							
09-sep	2,68	0,00	5,36	13-nov							
10-sep	1,34	0,45	4,47	14-nov							
11-sep	2,24	0,45	5,81	15-nov							
12-sep	4,47	2,24	10,73	16-nov							
13-sep	5,36	2,24	12,52	17-nov							
14-sep	4,02	1,34	7,60	18-nov							
15-sep	3,13	0,89	6,26	19-nov							
16-sep	1,34	0,45	4,47	20-nov							
17-sep	0,89	0,00	5,36	21-nov							

* El día 29 de
Febrero se hizo
media con el día 28
para no alterar los
modelos

Tabla A.13: Valores de viento en Lérida en 2008

A.2.3. VALORES MÁS RELEVANTES DEL AÑO Y PROMEDIOS.**Año 2005- Lérida**

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 16m/s
Velocidad del viento	2.6m/s	0.67m/s	10.3m/s	
Velocidad de ráfaga	6.5m/s		19.7m/s	7 días/año

Tabla A.14**Año 2006- Lérida**

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 16m/s
Velocidad del viento	2.3m/s	0.53m/s	7.6m/s	
Velocidad de ráfaga	5.92m/s		17.4m/s	2 días/año

Tabla A.15**Año 2007- Lérida**

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 16m/s
Velocidad del viento	2.64m/s	0.72m/s	8.5m/s	
Velocidad de ráfaga	6.5m/s		17.9m/s	5 días/año

Tabla A.16**Año 2008- Lérida**

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima anual	Días que se superan los 16m/s
Velocidad del viento	2.97m/s	0.76m/s	8.9m/s	
Velocidad de ráfaga	6.99m/s		18m/s	6 días/año

Tabla A.17**Globales 2005-2008- Lérida**

	Media de las máximas diarias	Media de las medias diarias	Máxima periodo	Media de días que se superan los 20m/s por año
Velocidad del viento	2.6m/s	0.67m/s	8.8m/s	
Velocidad de ráfaga	6.5m/s		18.3m/s	5 días/año

Tabla A. 18

A.2.4. GRÁFICAS DE VELOCIDADES MÁXIMAS DE VIENTO Y RÁFAGA.

Año 2005- Lérida:

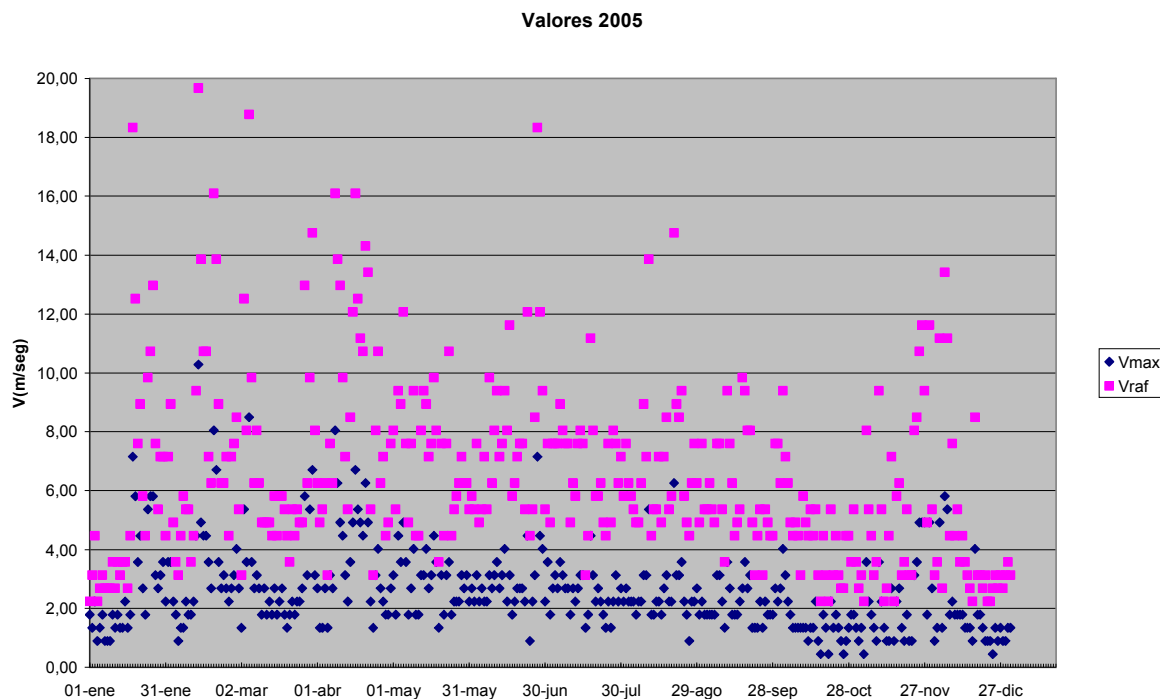


Imagen A.12: Representación gráfica de la tabla 5. Lérida.

Año 2006- Lérida:

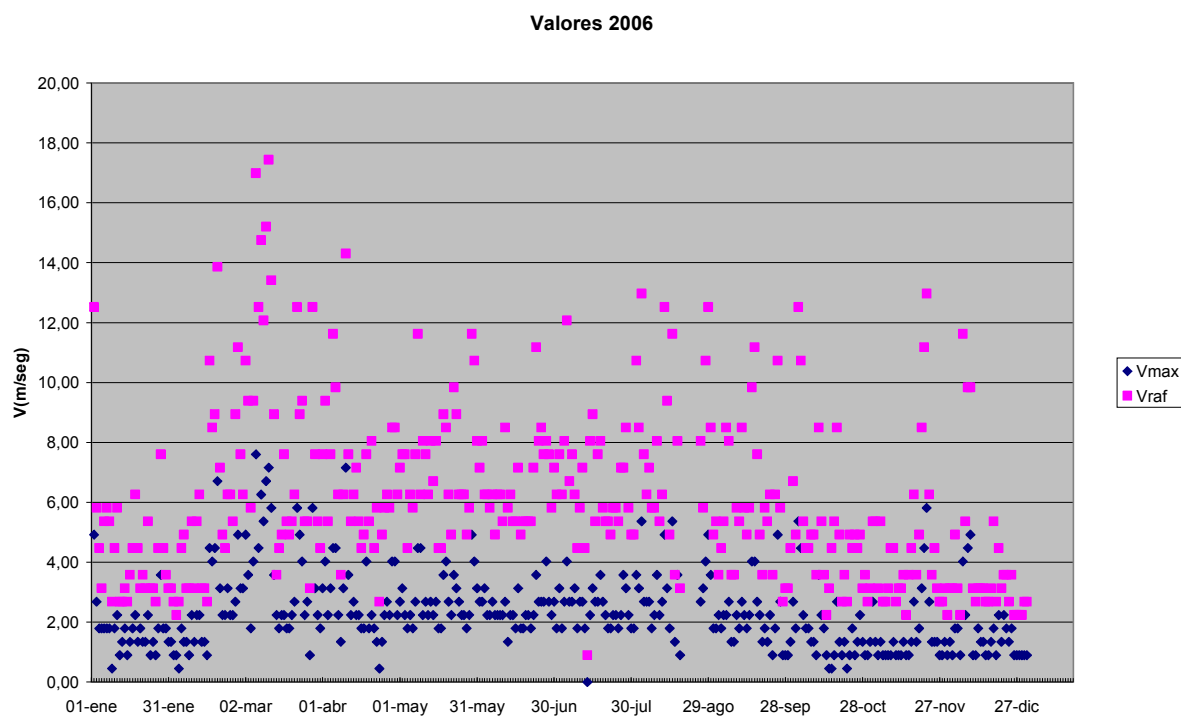


Imagen A.13: Representación gráfica de la tabla 6. Lérida.

Año 2007- Lérida:

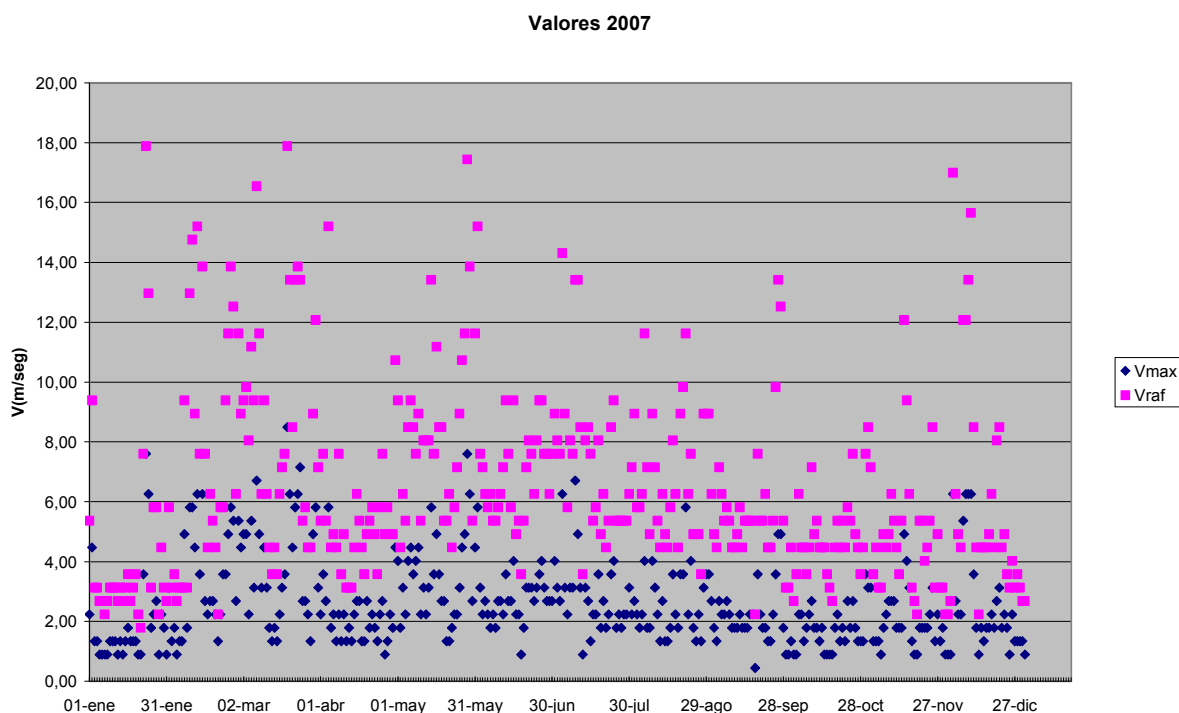


Imagen A.14: Representación gráfica de la tabla 7. Lérida.

Año 2008- Lérida:

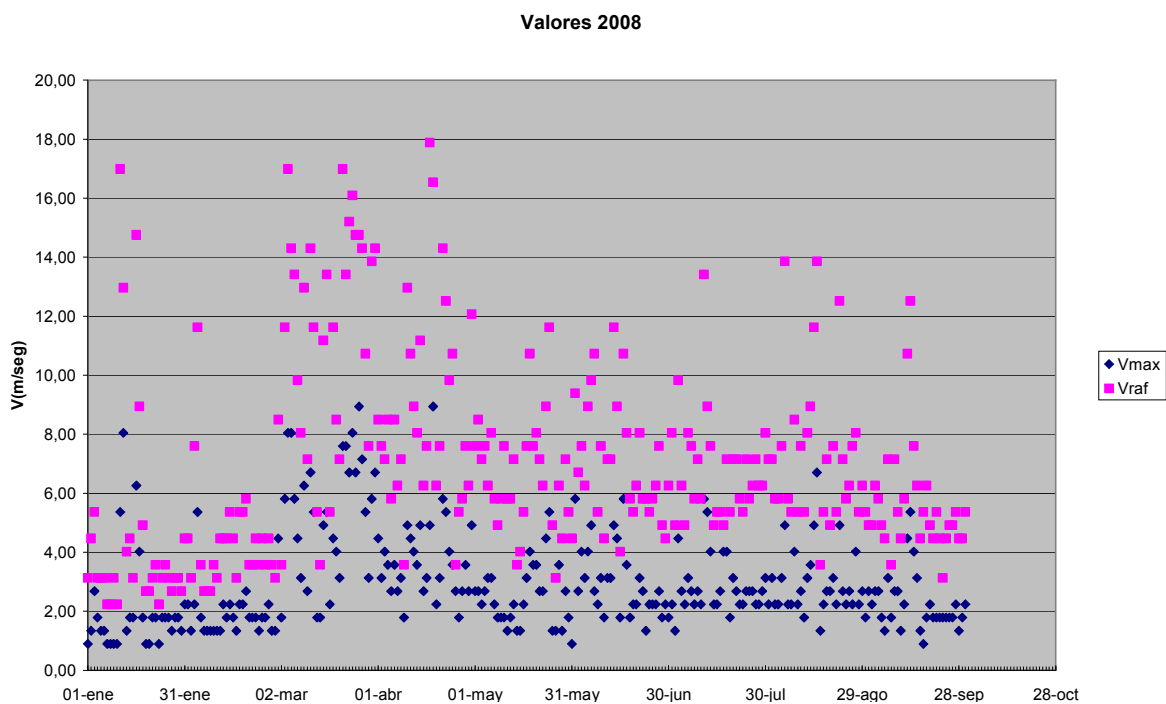


Imagen A.15: Representación gráfica de la tabla 8. Lérida.

A.2.5. GRÁFICAS DE DIRECCIÓN DEL VIENTO.

Año 2005- Lérida:

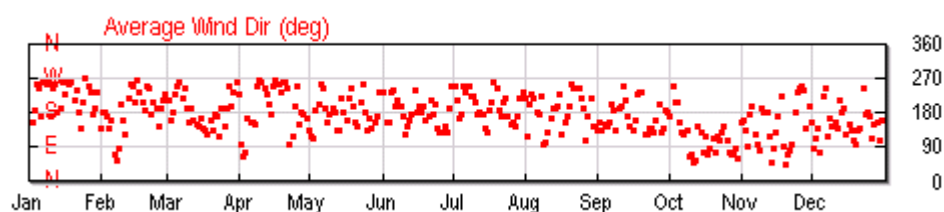


Imagen A.16: Gráfico de dirección media del viento en 2005. Lérida.

Año 2006- Lérida:

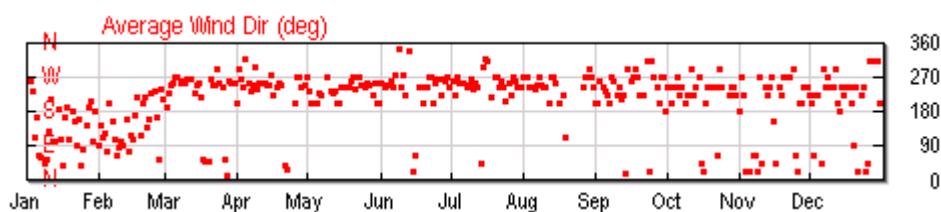


Imagen A.17: Gráfico de dirección media del viento en 2006. Lérida.

Año 2007- Lérida:

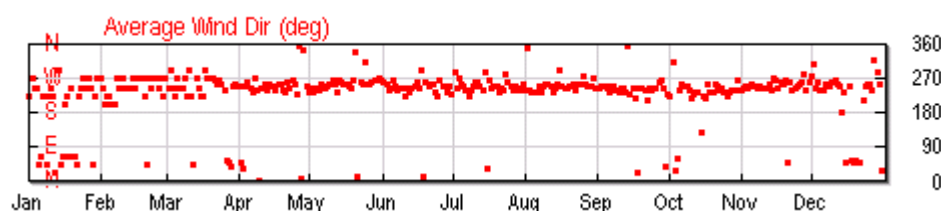


Imagen A.18: Gráfico de dirección media del viento en 2007. Lérida.

Año 2008- Lérida:

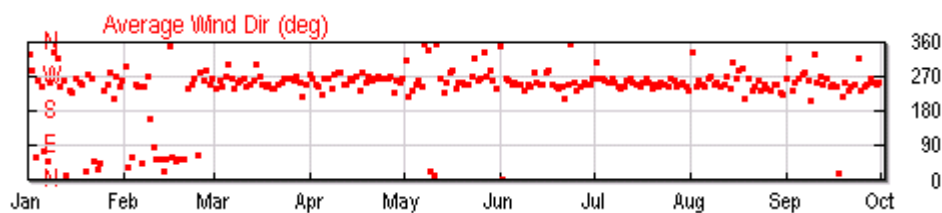


Imagen A.19: Gráfico de dirección media del viento en 2008. Lérida.

A.2.6. VALORACIÓN DE LOS DATOS.

Algunas conclusiones del muestreo:

- Las velocidades máximas de ráfaga pueden alcanzar los 18m/s un par de veces al año.
- Son habituales velocidades de ráfaga de más de 16m/s unos 4-5 días al año.
- Los vientos máximos se registran a lo largo de todo el año y no se aprecian meses más ventosos.
- La dirección del viento predominante en los últimos cuatro años es la OSO (Oeste SurOeste), salvo en los primeros meses del año que se aprecia cierta dispersión.

A.3. VALORACIÓN GENERAL DE LOS DATOS.

A la vista de los resultados numéricos obvia decir que el viento es mucho más intenso en Zaragoza que en Lérida. Este era uno de los motivos de emplear los valores de otra ciudad para poder demostrar que como indica la bibliografía la zona de Zaragoza está muy afectada por vientos fuertes.

También se puede observar que mientras que la dirección de los vientos en Lérida no está claramente marcada, la dirección de los vientos en Zaragoza está muy definida en las gráficas, es decir presenta una componente direccional muy constante.

Este anexo pretende visualizar los altos valores de viento existentes en Zaragoza, así como sus direcciones predominantes. Además aprovecha para compararlos con los de Lérida, ya que ambas estaciones meteorológicas se encuentran cercanas a la línea de alta velocidad objeto del proyecto.

ANEXO B

ANEXO B: MÉTODO DE DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE FLUJO.

La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, es lo que se llama proceso de discretización numérica. Dependiendo de los principios en que se basen hay varias técnicas de discretización, siendo las más usadas: diferencias finitas, volúmenes finitos, y elementos finitos. El programa de CFD que se emplea en este proyecto utiliza la discretización por volúmenes finitos.

El Método de los volúmenes finitos consiste en convertir las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, mediante una transformación física de éstas. El siguiente anexo permite una introducción a esta técnica.

Para discretizar se crean volúmenes finitos (particiones del espacio) en una dirección, y se fija la atención en el volumen n-ésimo por simplicidad. Aquí nos centraremos en un problema en dos dimensiones como el que afronta este proyecto.

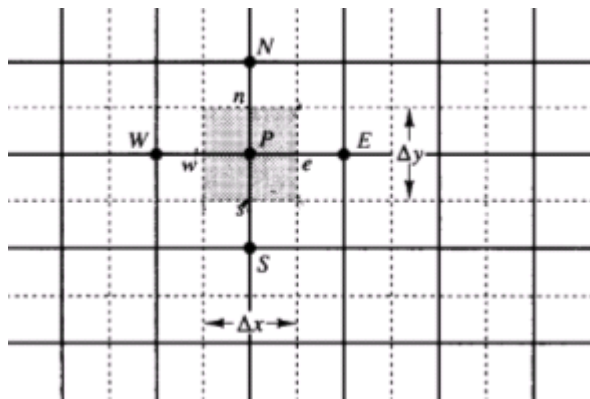


Imagen B.1: Volumen típico de control y notación usada para una malla de dos dimensiones.

En la figura se puede ver un volumen finito, o celda, típico donde el centro del volumen, punto P, es el punto de referencia en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial.

Supóngase que se quiere discretizar la derivada segunda siguiente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (B.1)$$

Hay que hacerlo a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda en la dirección “x” marcada por la derivada y en el punto P:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_P = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x_e} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x_w} \right)}{x_e - x_w} \quad (B.2)$$

Estas derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centro de las celdas vecinas:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_e &= \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P} \\ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_w &= \frac{U_P - U_W}{x_P - x_W} \end{aligned} \quad (B.3)$$

Estas expresiones son empleadas para implementar las derivadas de las ecuaciones en cualquier celda. De esta forma, se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito, y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resulta. De la misma manera, pueden introducirse las condiciones de contorno, añadiendo términos fuente en las ecuaciones de las celdas correspondientes.

Una vez discretizadas las ecuaciones diferenciales, lo que se obtiene es un sistema de ecuaciones algebraicas, que se puede escribir en notación matricial de la siguiente manera:

$$Ax = b \quad \text{o}' \quad \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (B.4)$$

Donde A es la matriz del sistema, b es la columna de términos independientes, y x es el vector incógnita. Para resolver este sistema de ecuaciones, existen dos tipos de métodos: los directos y los iterativos.

Los métodos directos consisten en hallar la inversa de la matriz A . Pero cuando la matriz es un poco grande estos métodos no son rentables, computacionalmente hablando. Los métodos iterativos tratan de hallar la solución partiendo de una solución aproximada y calculando, a partir de ella, una solución más aproximada, acercándose en cada iteración a la solución real. Estos últimos son los que emplean los programas de CFD.

Pero estos métodos que resuelven sistemas de ecuaciones lineales con coeficientes constantes, no se pueden usar directamente para resolver las ecuaciones del flujo, pues como se vio, no son lineales (hay en ellas productos de variables).

Además, la velocidad y la presión del fluido pueden depender del tiempo, por lo que hay que resolver todo el sistema para cada instante de tiempo. Por tanto, habrá que discretizar el tiempo, como ya se hizo con el resto de variables, y resolver el sistema para cada paso temporal.

Para que sea posible emplear los métodos de resolución de sistemas que se han comentado, se linealizan las ecuaciones. Los términos no lineales, son los productos de las velocidades por sus derivadas. Por ello se discretiza la derivada, y se usa el valor de la velocidad existente en la celda de que se trate:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \text{ se convierte en } \vec{u} \cdot \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\delta x} \quad (\text{B.5})$$

Así se puede resolver iterativamente el sistema lineal de ecuaciones. Una vez resuelto, el valor de la velocidad en la celda i,j habrá cambiado, se vuelve a linealizar el sistema con los nuevos valores de las velocidades, y se repite el proceso hasta que se llegue a una solución.

Posteriormente, habrá que incrementar el paso temporal, y resolver el sistema para el nuevo instante de tiempo. En el caso de que sea un problema estacionario, como el de este trabajo, este último proceso de cambiar el paso temporal se omite.

ANEXO C

ANEXO C. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PREVIOS.

Este anexo recoge los resultados más importantes de los ensayos previos de evaluación. Se recogen los datos y gráficos más representativos. Este estudio previo de evaluación está dividido en cinco ensayos, cada uno con sus objetivos específicos definidos en la memoria.

En total se recogen en este anexo los resultados de 86 simulaciones, clasificadas cada una de ellas por ensayo, bloque, y nomenclatura.

C.1. ENSAYO 0.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 0. La primera columna indica el bloque en el que se clasifica cada simulación, la segunda su nomenclatura y la tercera la altura de la barrera Tipo A empleada.

Bloque	Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
0.1	Emp1_B_0	0	0,36814	1,15074
	Emp1_B_1	1	0,15539	1,05793
	Emp1_B_2	2	-0,33809	0,58864
	Emp1_B_4	4	-0,13583	0,08491
0.2	Emp1_S_0	0	0,47374	1,00960
	Emp1_S_1	1	0,05471	0,47963
	Emp1_S_2	2	-0,47765	-0,02263
	Emp1_S_4	4	-0,78941	0,00687
0.3	Emp2_B_0	0	0,36814	1,15074
	Emp2_B_1	1	0,53360	1,09336
	Emp2_B_2	2	0,45510	0,89290
	Emp2_B_4	4	-0,28286	0,14365
0.4	Emp2_S_0	0	0,47374	1,00960
	Emp2_S_1	1	0,53636	0,89172
	Emp2_S_2	2	0,49239	0,72244
	Emp2_S_4	4	-0,35635	0,06176

Tabla C.1: Valores de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 0.

BLOQUE 0.1: EMPLAZAMIENTO 1 Y TREN EN VÍA DE BARLOVENTO.

Mapa de presiones

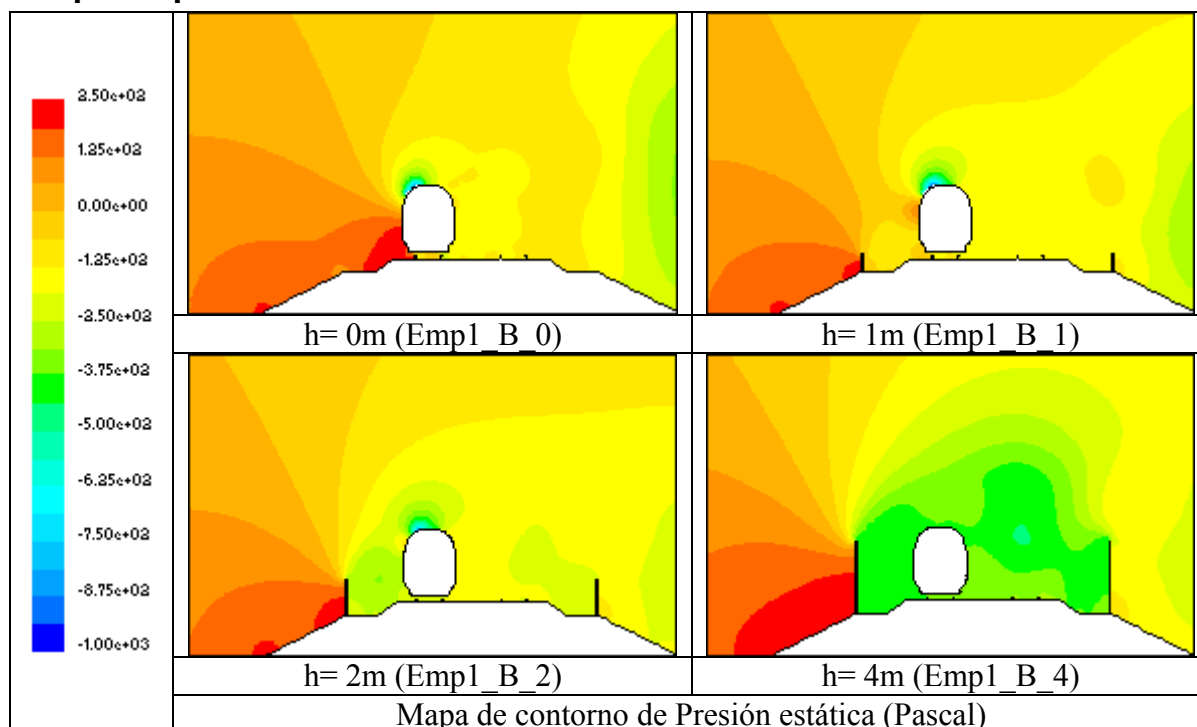


Tabla C.2: Mapa de presiones del modelo con el Emplazamiento1 y tren a barlovento (Ensayo 0)

Mapa de velocidades

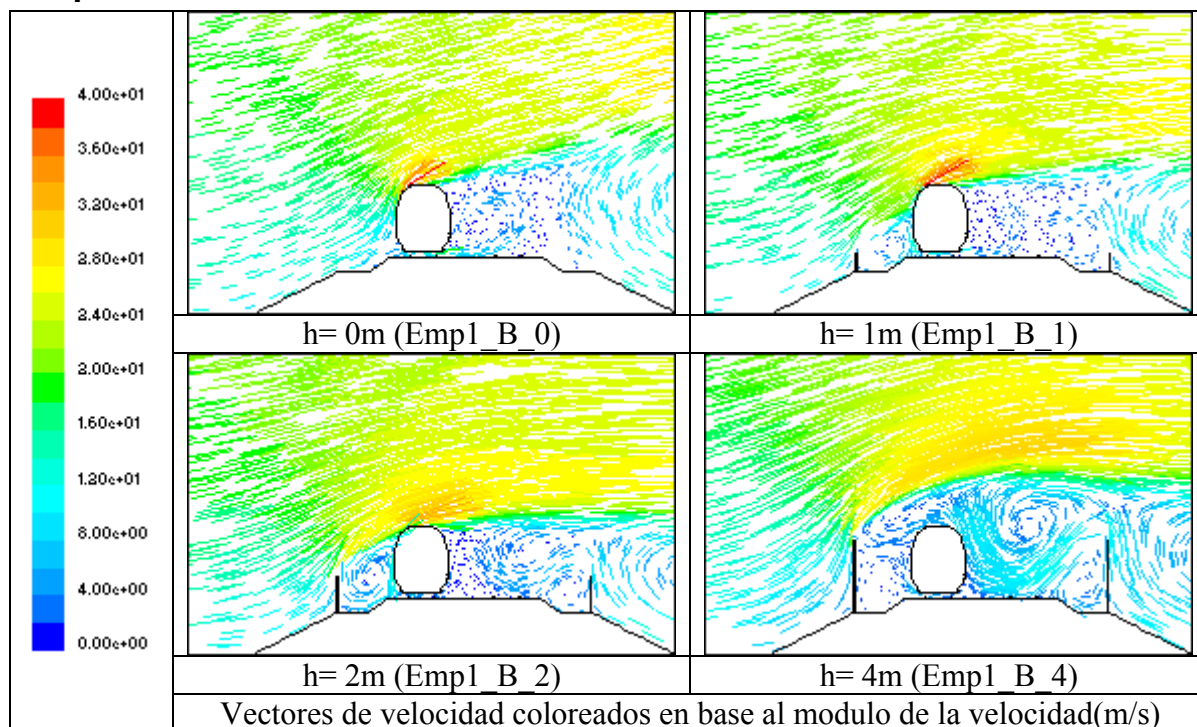


Tabla C.3: Mapa de vectores de velocidad del modelo con el Emplazamiento 1 y tren a barlovento (Ensayo 0)

BLOQUE 0.2: EMPLAZAMIENTO 1 Y TREN EN VÍA DE SOTAVENTO.

Mapa de presiones

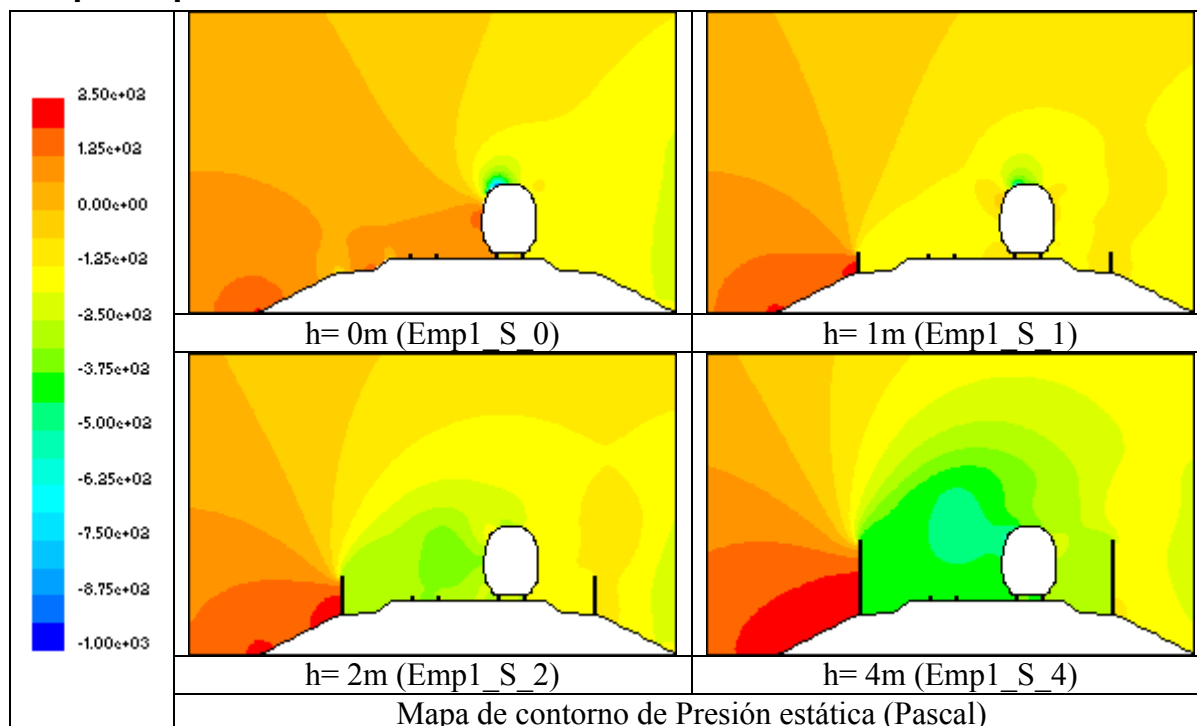


Tabla C.4: Mapa de presiones del modelo con el Emplazamiento 1 y tren a sotavento (Ensayo 0)

Mapa de velocidades

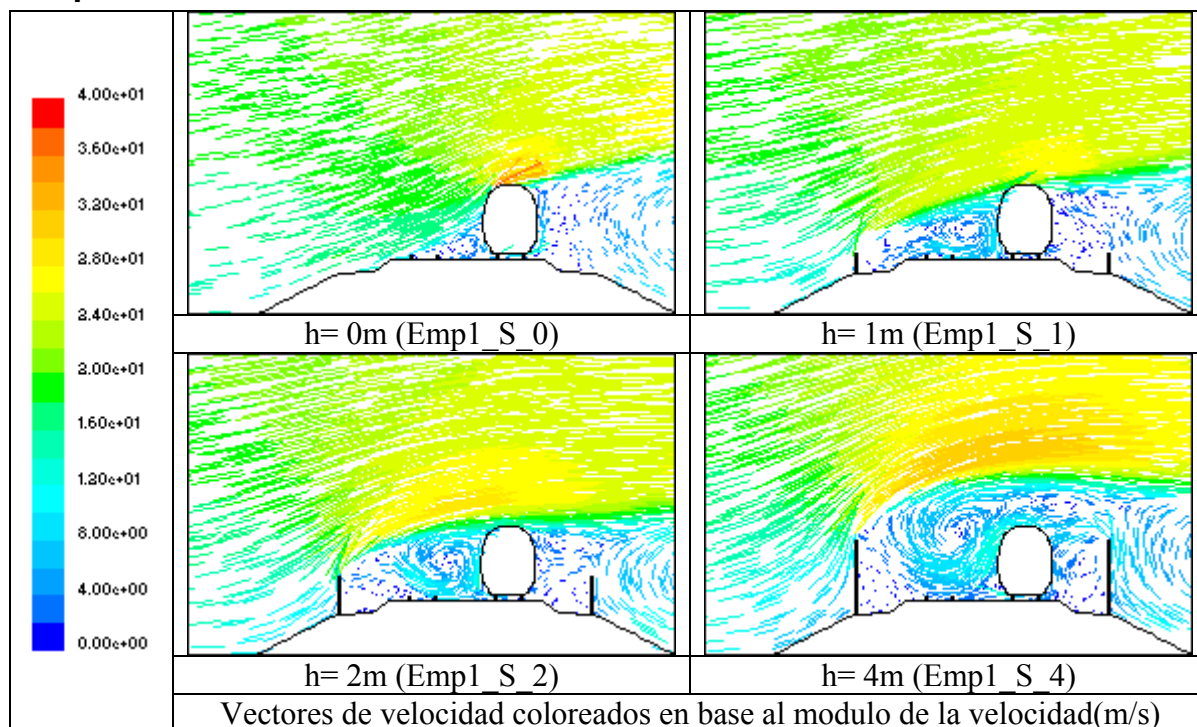


Tabla C.5: Mapas de vectores de velocidad del modelo con el Emplazamiento 1 y tren a sotavento (Ensayo 0)

BLOQUE 0.3: EMPLAZAMIENTO 2 Y TREN EN VÍA DE BARLOVENTO.

Mapa de presiones

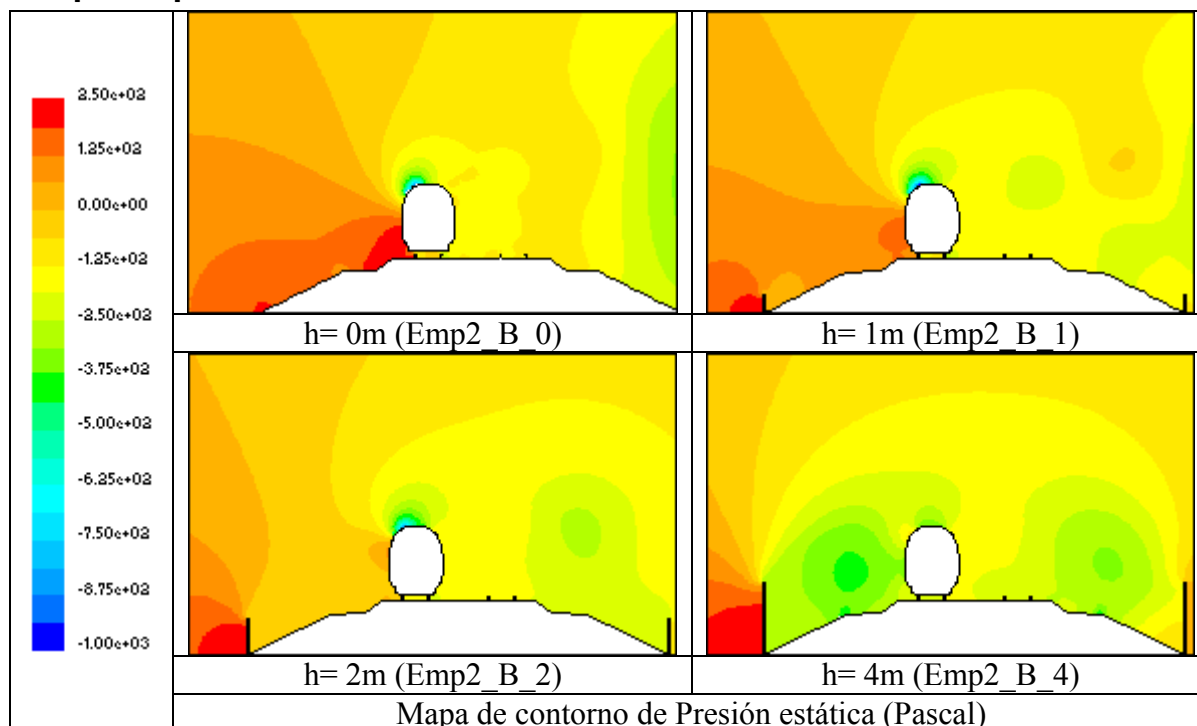


Tabla C.6: Mapa de presiones del modelo con el Emplazamiento 2 y tren a barlovento (Ensayo 0)

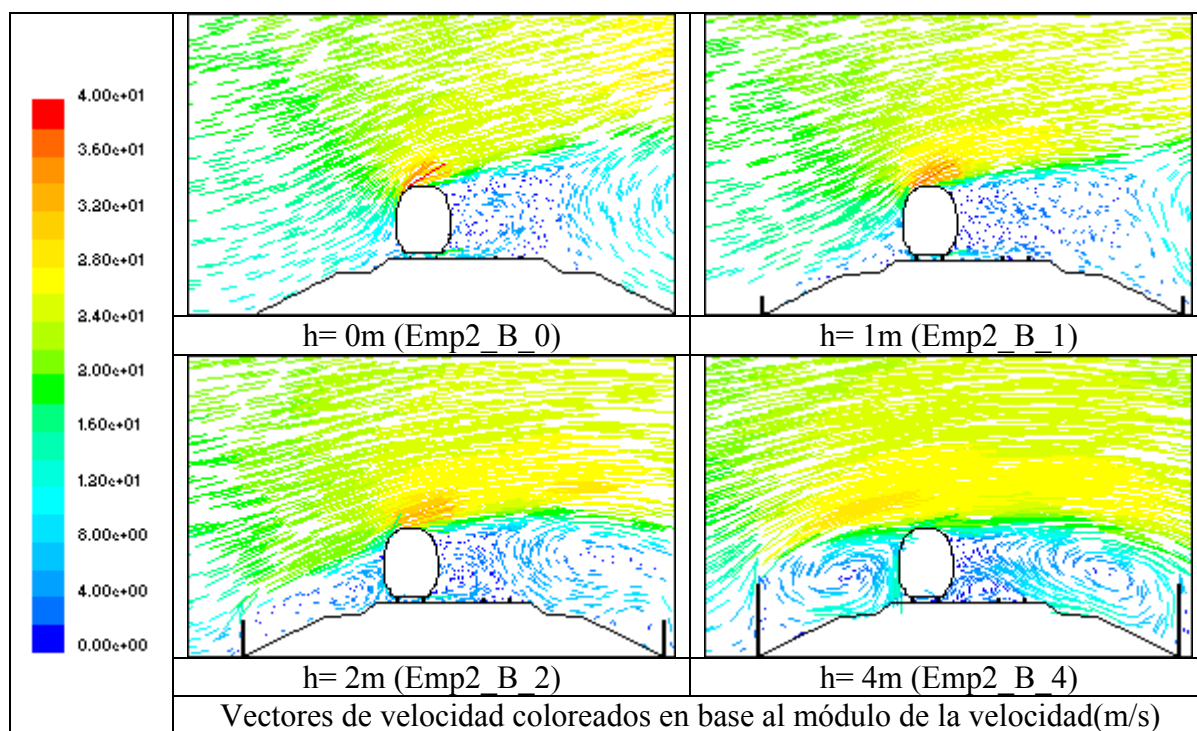


Tabla C.7: Mapa de vectores de velocidad del modelo con el Emplazamiento 2 y tren a barlovento (Ensayo 0)

BLOQUE 0.4: EMPLAZAMIENTO 2 Y TREN EN VÍA DE SOTAVENTO.

Mapa de presiones

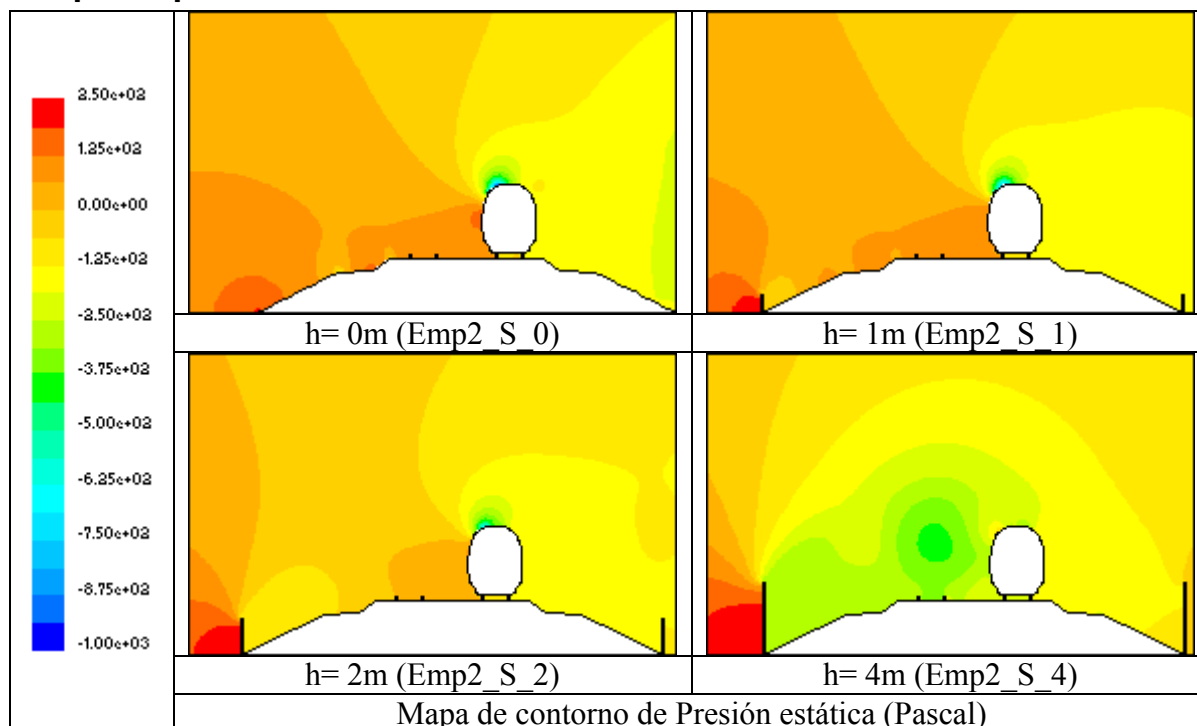


Tabla C.8: Mapa de presiones del modelo con el Emplazamiento 2 y tren a sotavento (Ensayo 0)

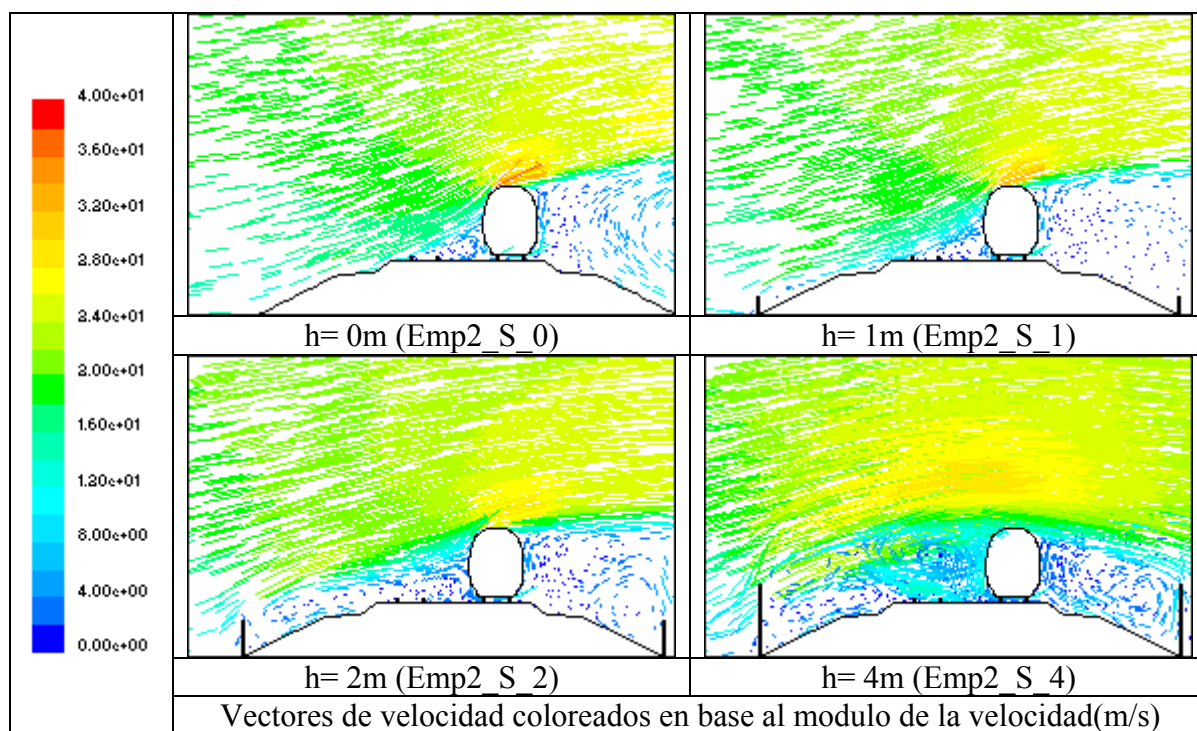


Tabla C.9: Mapas de vectores de velocidad del modelo con el Emplazamiento 2 y tren a sotavento (Ensayo 0)

C.2. ENSAYO 1.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 1. La primera columna indica el bloque en el que se clasifica cada simulación, la segunda su nomenclatura y la tercera la altura de la barrera Tipo A empleada.

Bloque	Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
1.1	T2B_0A0	0	1,2194927	0,2703050
	T2B_1A0	1	0,7935531	0,2659025
	T2B_2A0	2	-0,1646818	0,2445040
	T2B_3A0	3	-0,4765555	-0,2318811
	T2S_0A0	0	1,0539936	0,2211851
	T2S_1A0	1	0,1275486	0,3853453
	T2S_2A0	2	-0,5134911	-0,1730394
	T2S_3A0	3	-0,8553061	-0,3513406
1.2	T3B_0A0	0	0,4168899	1,1207186
	T3B_1A0	1	0,2104909	1,0569993
	T3B_2A0	2	-0,2304454	0,6584506
	T3B_3A0	3	-0,7818521	-0,3146526
	T3S_0A0	0	0,4481787	0,9014278
	T3S_1A0	1	0,1263699	0,4955633
	T3S_2A0	2	-0,3682925	0,0420991
	T3S_3A0	3	-0,9180226	-0,2693828
1.3	V2B_0A0	0	1,7261739	0,5244250
	V2B_1A0	1	1,0387731	0,3668417
	V2B_2A0	2	-0,2866361	0,2190543
	V2B_3A0	3	-0,5716083	-0,2943029
	V2S_0A0	0	1,1548073	0,2375256
	V2S_1A0	1	0,6516785	0,2889970
	V2S_2A0	2	-0,6190016	-0,2784588
	V2S_3A0	3	-0,5803078	-0,3393082
1.4	V3B_0A0	0	0,6344498	1,6906995
	V3B_1A0	1	0,3363531	1,2631021
	V3B_2A0	2	-0,1070910	0,8492708
	V3B_3A0	3	-0,7553656	-0,1606632
	V3S_0A0	0	0,6432729	1,3365603
	V3S_1A0	1	0,2949446	0,5878036
	V3S_2A0	2	-0,4820216	0,0231849
	V3S_3A0	3	-0,9253280	-0,2277481

Tabla C.10: Valores de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 1.

BLOQUE 1.1: TERRAPLÉN CON TREN 102.

Mapas de presiones.

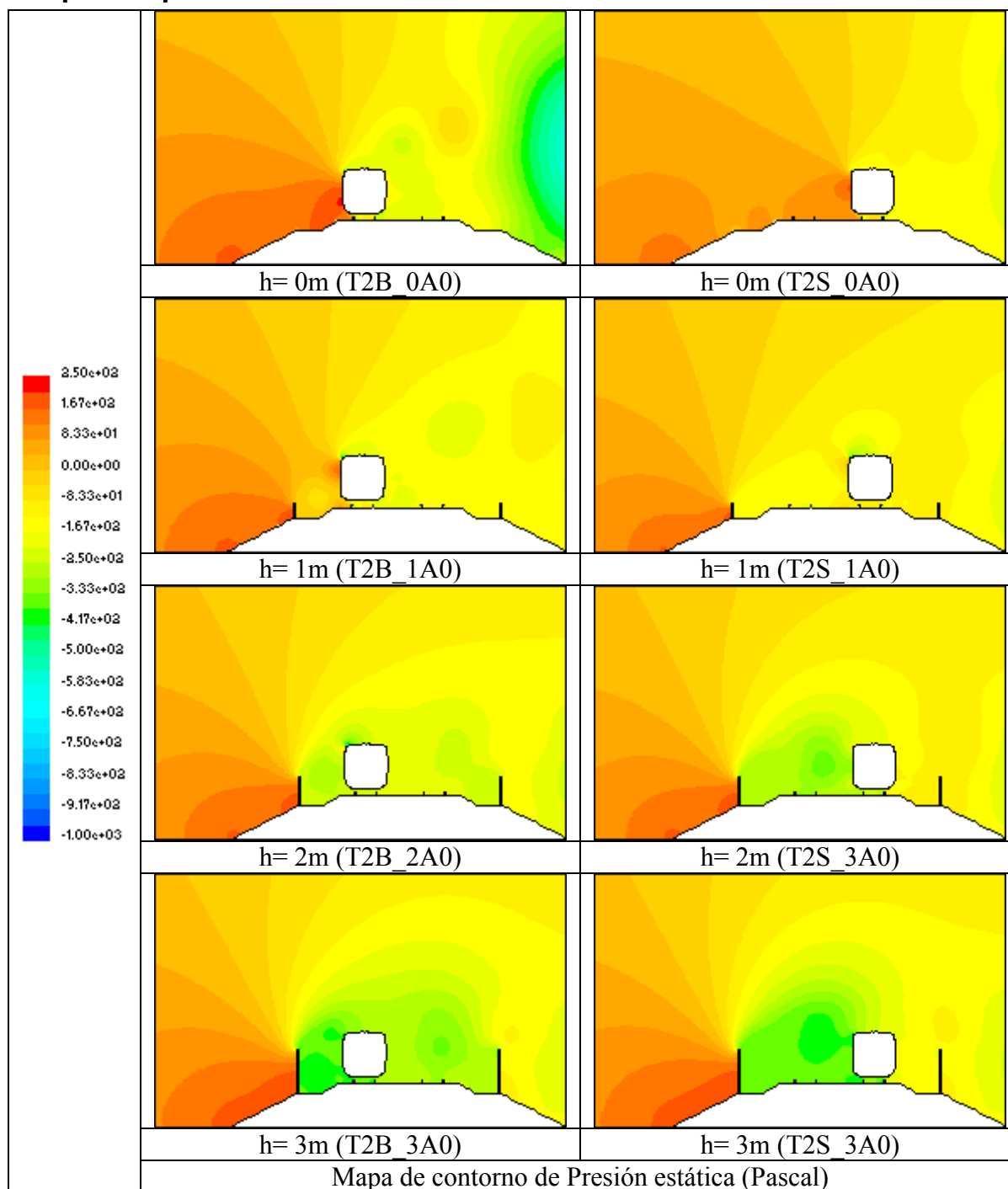


Tabla C.11: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento y sotavento sobre vía en terraplén (Ensayo 1).

Mapas de velocidades.

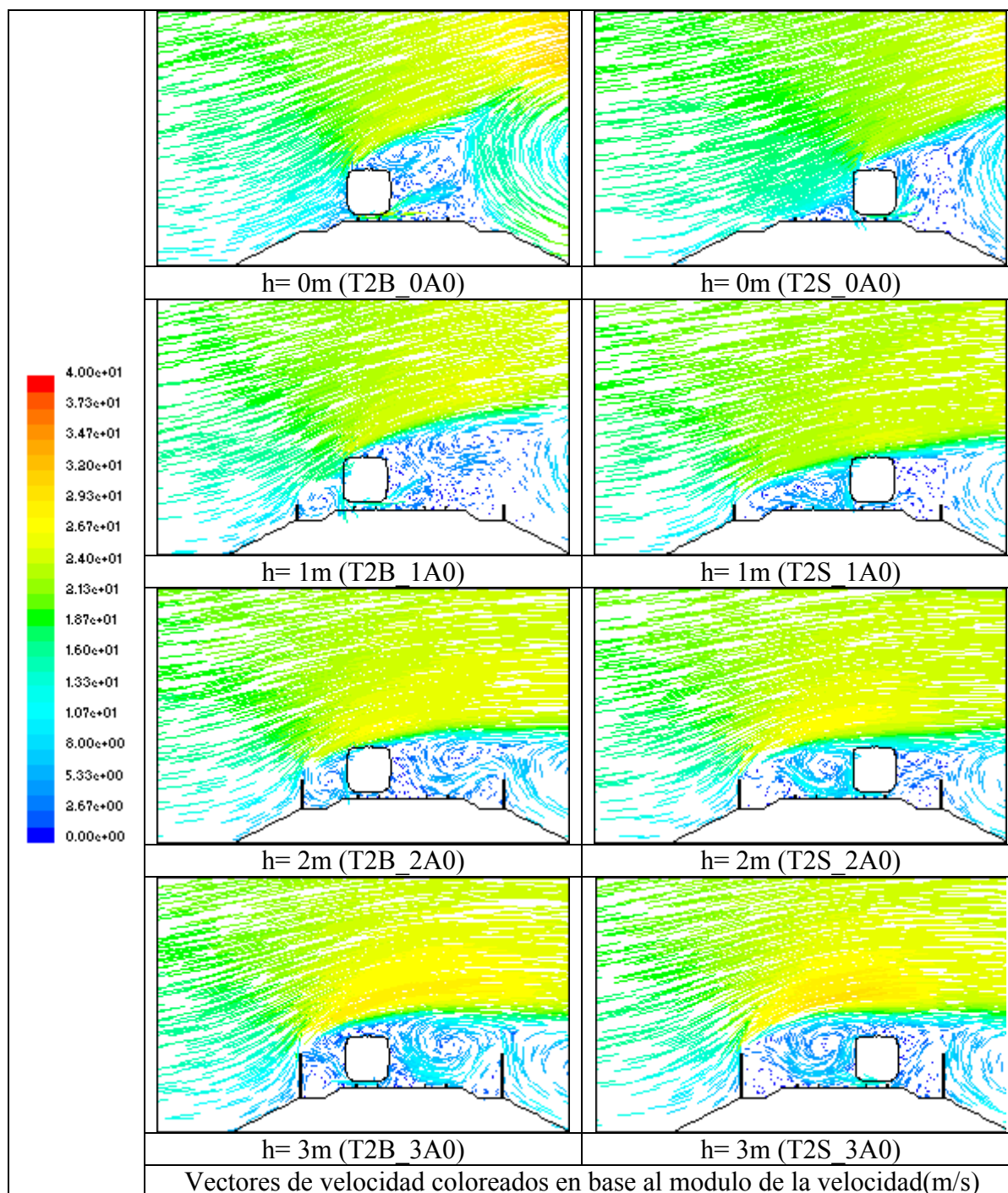


Tabla C.12: Mapas de velocidades de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento y sotavento sobre vía en terraplén (Ensayo 1).

BLOQUE 1.2: TERRAPLÉN CON TREN 103.

Mapas de presiones.

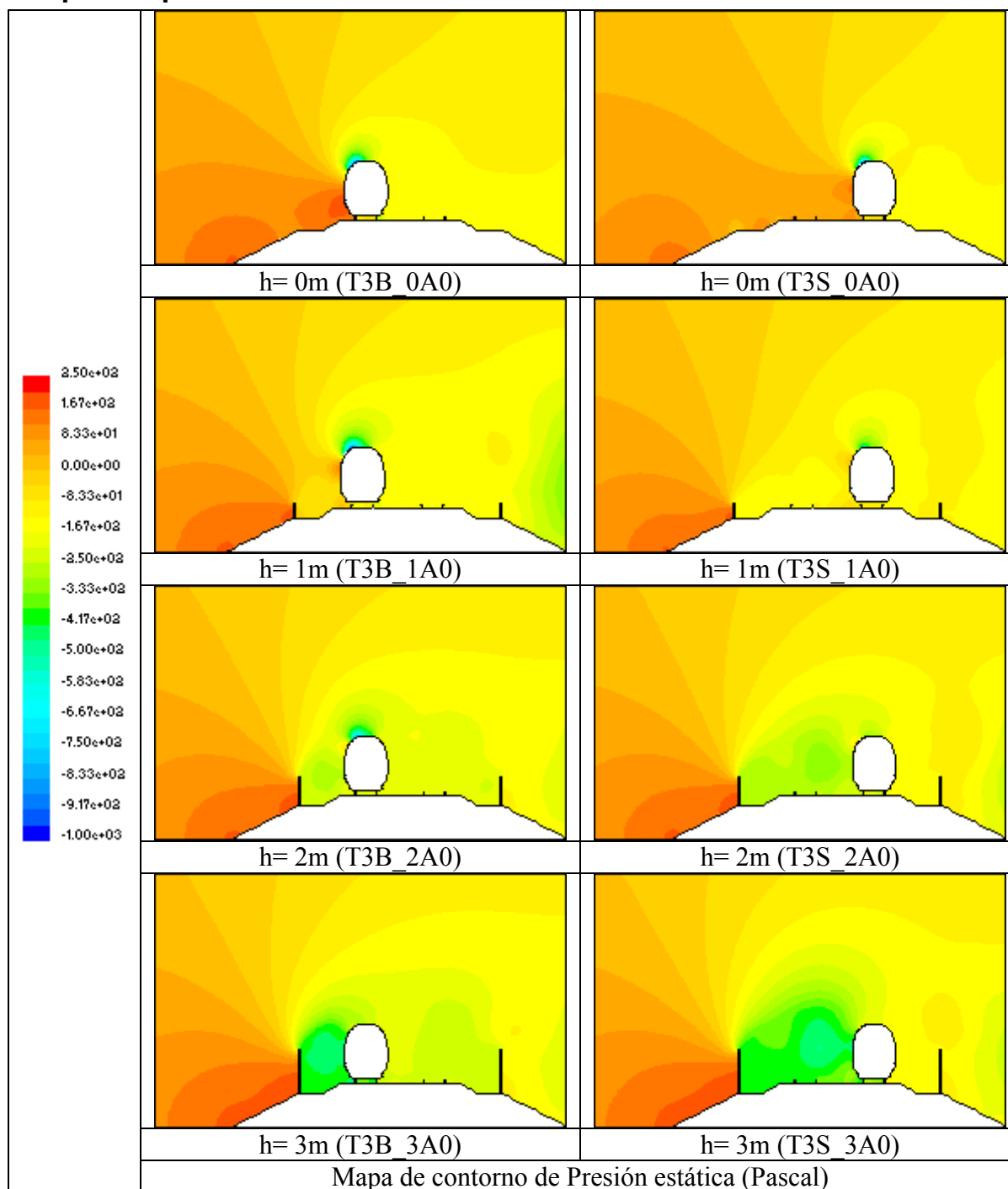


Tabla C.13: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento y sotavento sobre vía en terraplén (Ensayo 1).

Mapas de velocidades.

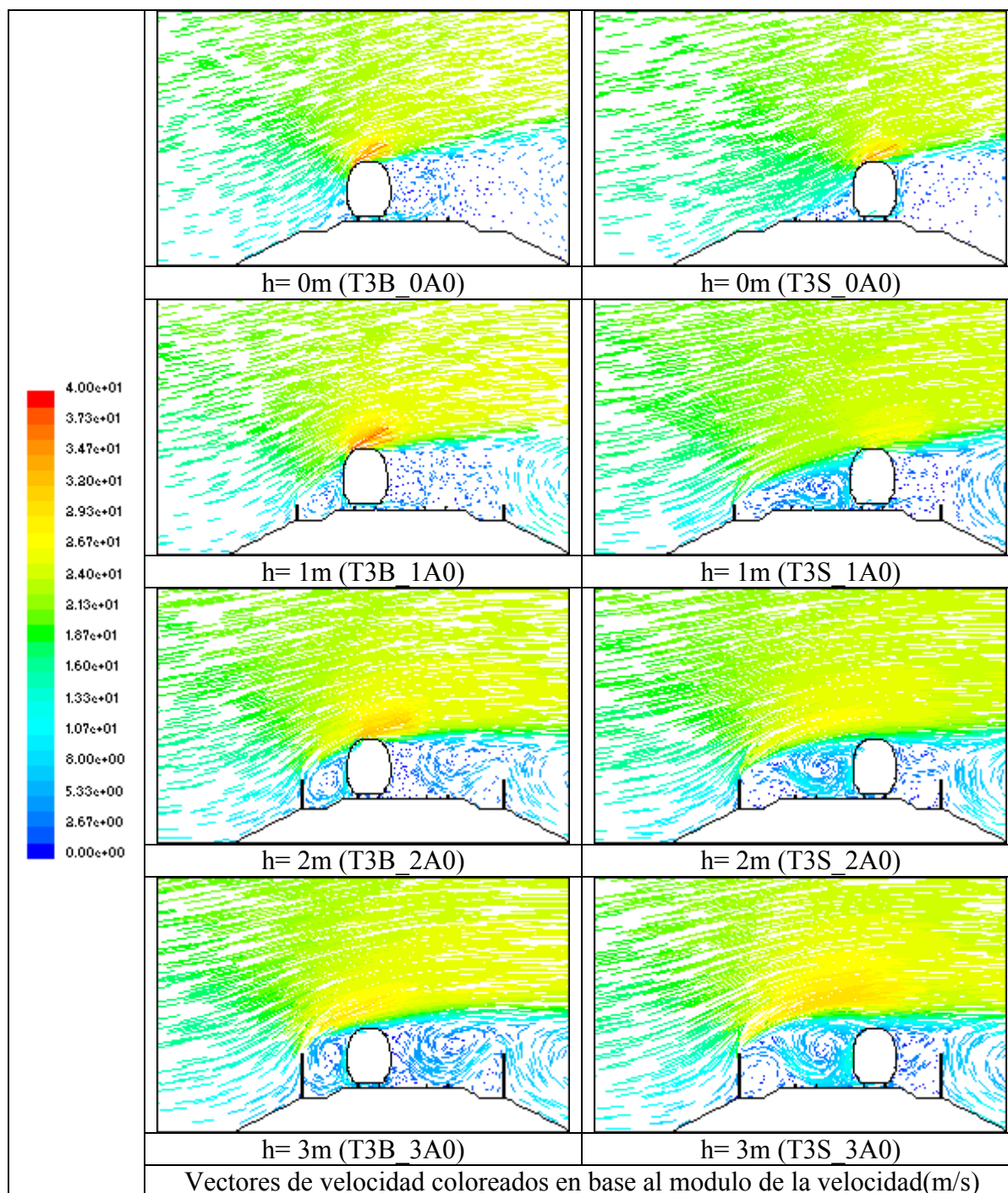


Tabla C.14: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento y sotavento sobre vía en terraplén (Ensayo 1).

BLOQUE 1.3: VIADUCTO CON TREN 102.

Mapas de presiones.

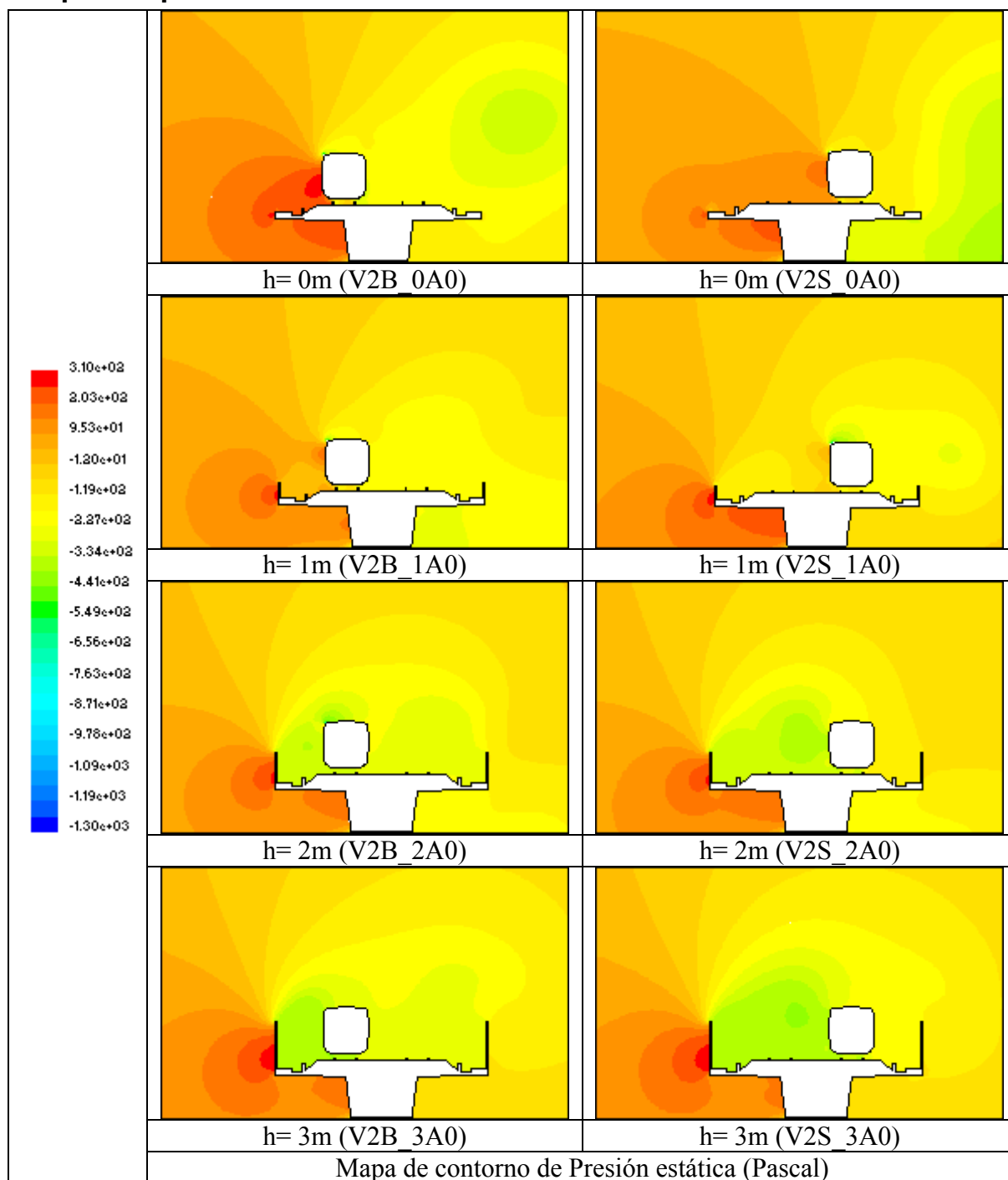


Tabla C.15: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento y sotavento sobre vía en viaducto (Ensayo 1).

Mapas de velocidades.

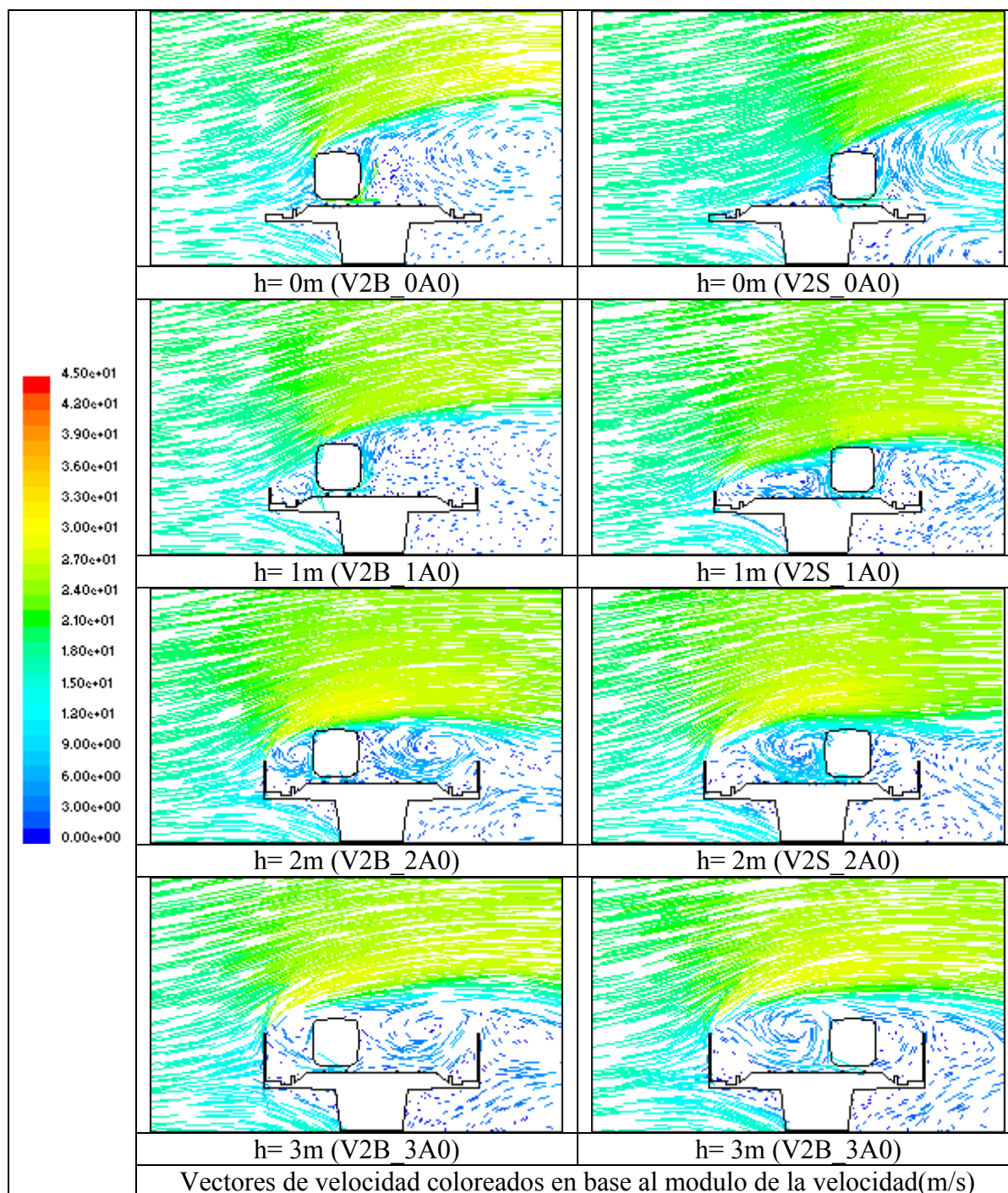


Tabla C.16: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento y sotavento sobre vía en viaducto (Ensayo 1).

BLOQUE 1.4: VIADUCTO CON TREN 103.

Mapas de presiones.

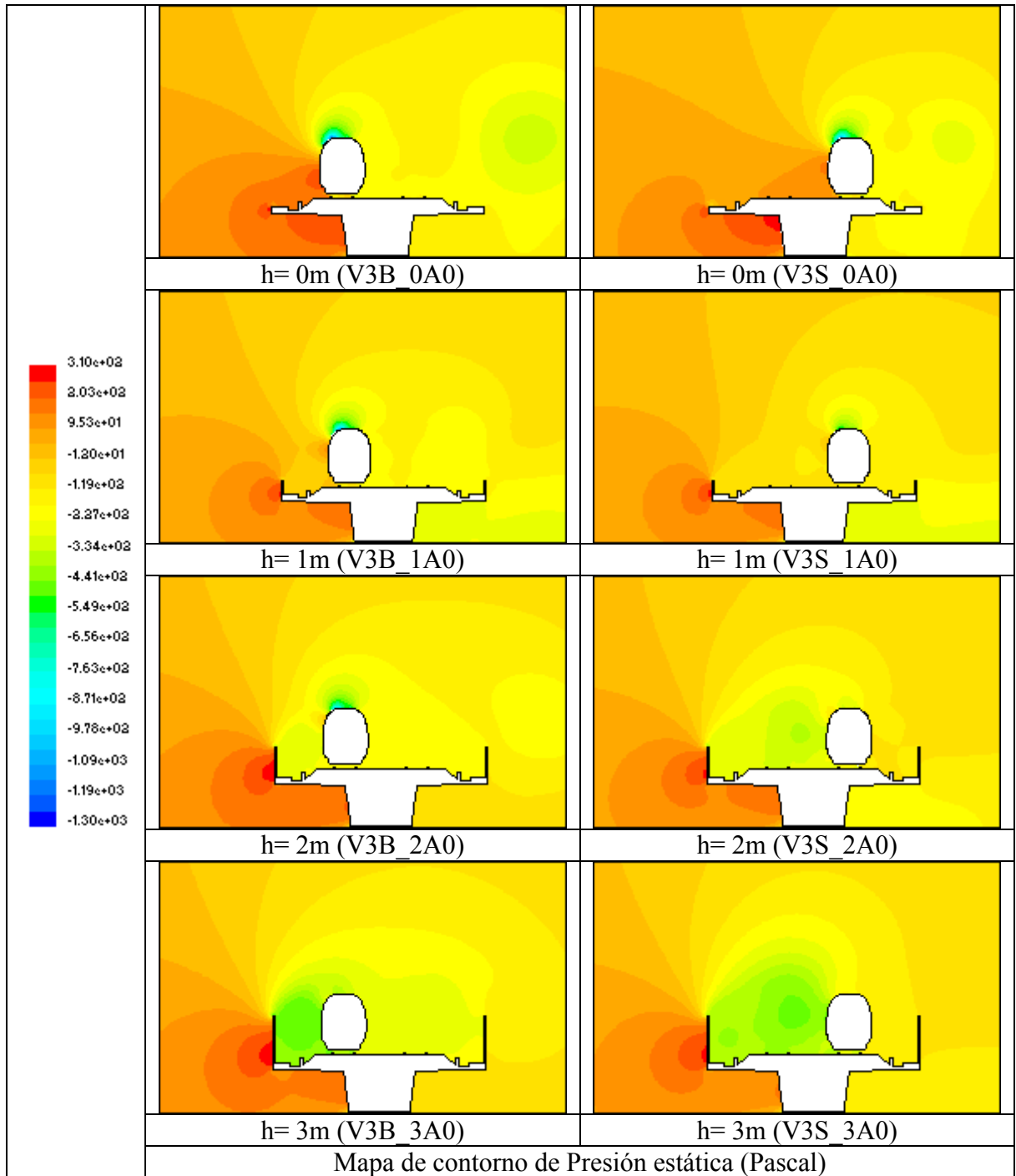


Tabla C.1719: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento y sotavento sobre vía en viaducto (Ensayo 1).

Mapas de velocidades.

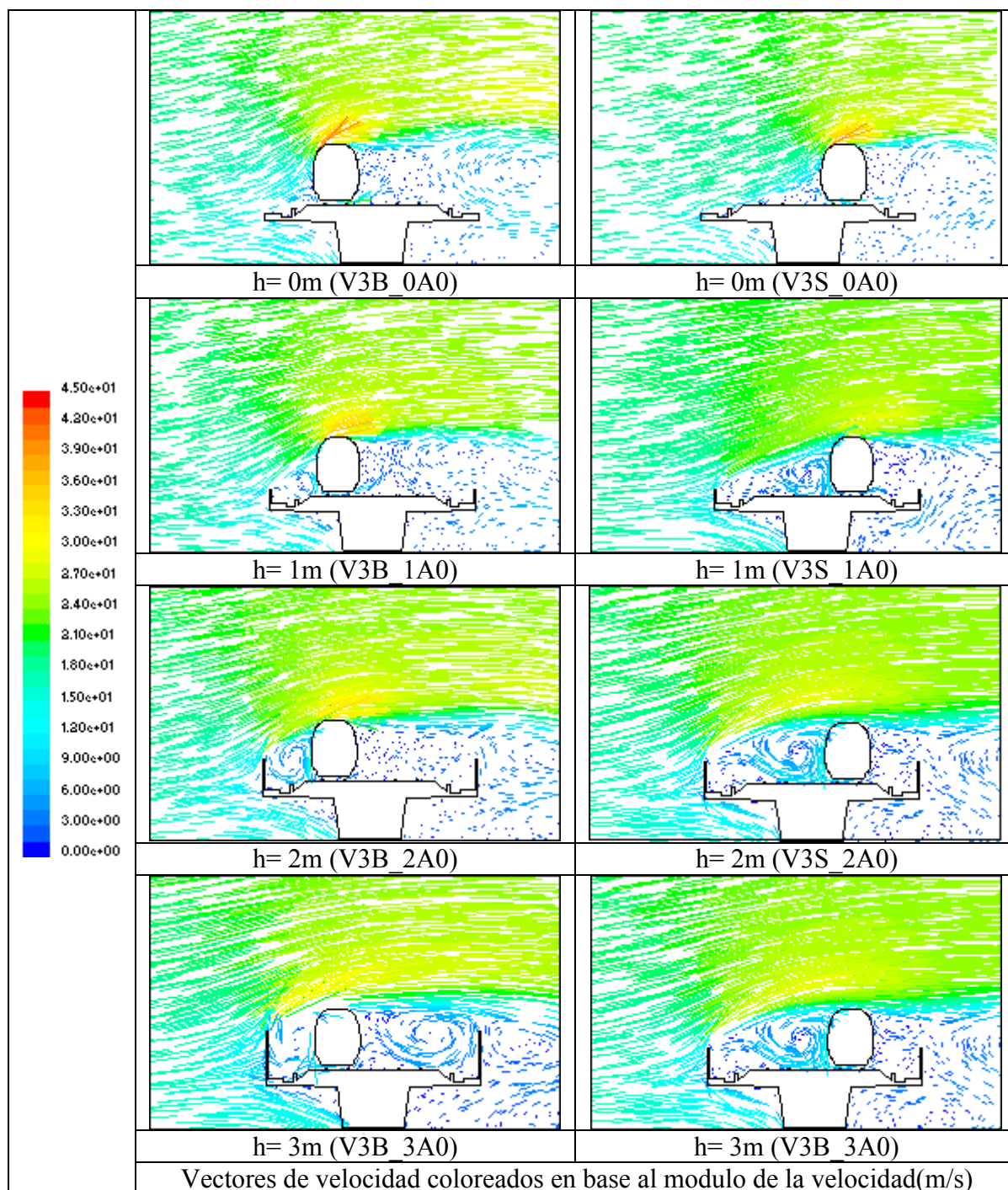


Tabla C.18: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento y sotavento sobre vía en viaducto (Ensayo 1).

C.3. ENSAYO 2.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 2. La primera columna indica el bloque en el que se clasifica cada simulación, la segunda su nomenclatura y la tercera la altura de la barrera Tipo A empleada.

Bloque	Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
2.1	T2B_0A0	0	1,2194927	0,2703050
	T2B_0,5A0	0,5	1,0518039	0,2238758
	T2B_1A0	1	0,7935531	0,2659025
	T2B_1,5A0	1,5	0,3470024	0,3592025
	T2B_2A0	2	-0,1646818	0,2445040
	T2B_2,5A0	2,5	-0,5757395	-0,2717234
	T2B_3A0	3	-0,4765555	-0,2318811
2.2	T3B_0A0	0	0,4168899	1,1207186
	T3B_0,5A0	0,5	0,3203867	1,2448895
	T3B_1A0	1	0,2104909	1,0569993
	T3B_1,5A0	1,5	0,0190974	0,9293338
	T3B_2A0	2	-0,2304454	0,6584506
	T3B_2,5A0	2,5	-0,4994028	0,1096028
	T3B_3A0	3	-0,7818521	-0,3146526
2.3	V2B_0A0	0	1,7261739	0,5244250
	V2B_0,5A0	0,5	1,4476020	0,3588601
	V2B_1A0	1	1,0387731	0,3668417
	V2B_1,5A0	1,5	0,4469187	0,4310161
	V2B_2A0	2	-0,2866361	0,2190543
	V2B_2,5A0	2,5	-0,8705953	-0,3967907
	V2B_3A0	3	-0,5716083	-0,2943029
2.4	V3B_0A0	0	0,6344498	1,6906995
	V3B_0,5A0	0,5	0,3862583	1,4592262
	V3B_1A0	1	0,3363531	1,2631021
	V3B_1,5A0	1,5	0,0210520	1,0581977
	V3B_2A0	2	-0,1070910	0,8492708
	V3B_2,5A0	2,5	-0,5488338	0,0460267
	V3B_3A0	3	-0,7553656	-0,1606632

Tabla C.19: Valores de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 2.

BLOQUE 2.1: TERRAPLÉN CON TREN 102.

Mapas de presiones.

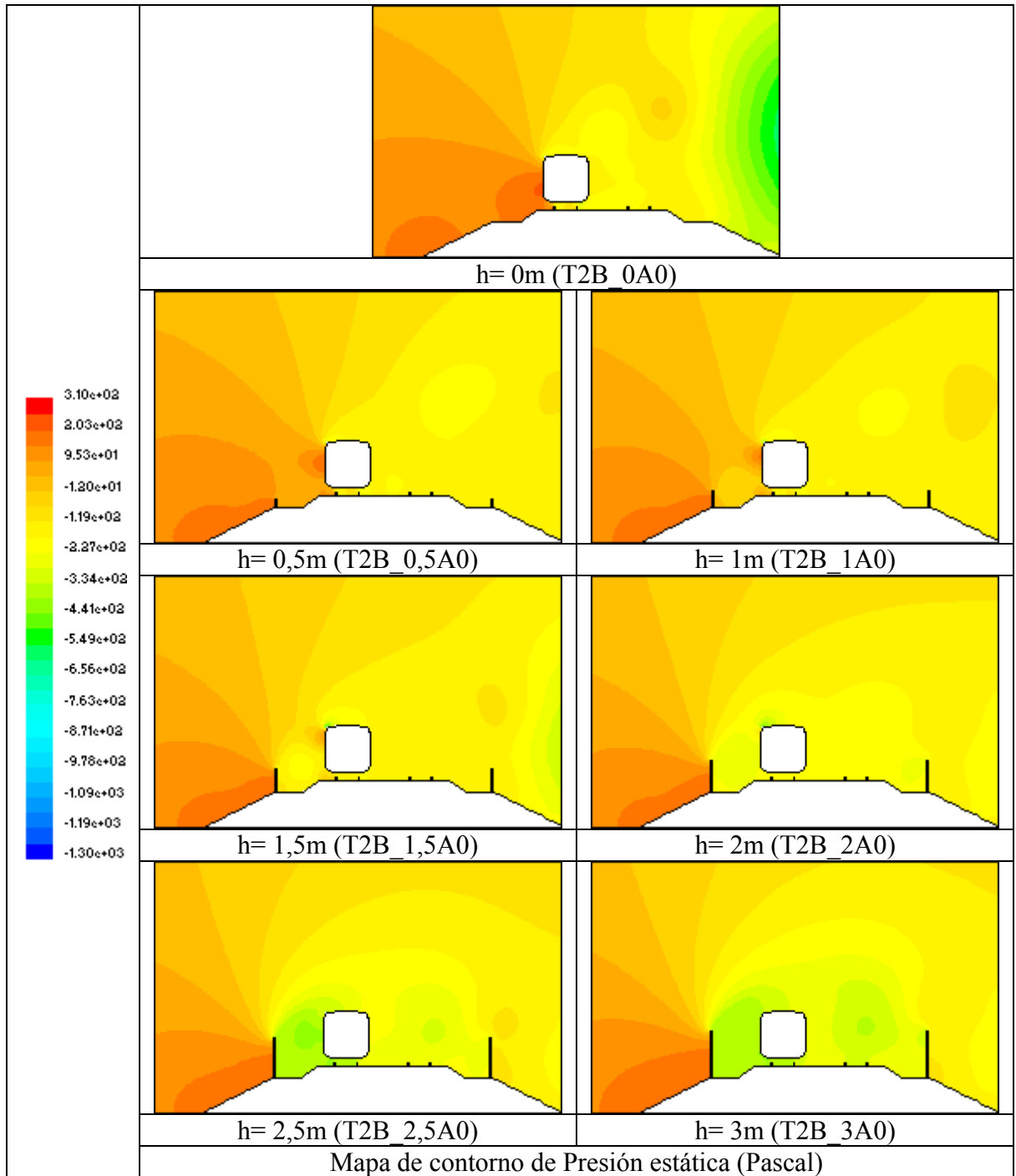


Tabla C.20: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento sobre vía en terraplén y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

Mapas de velocidades.

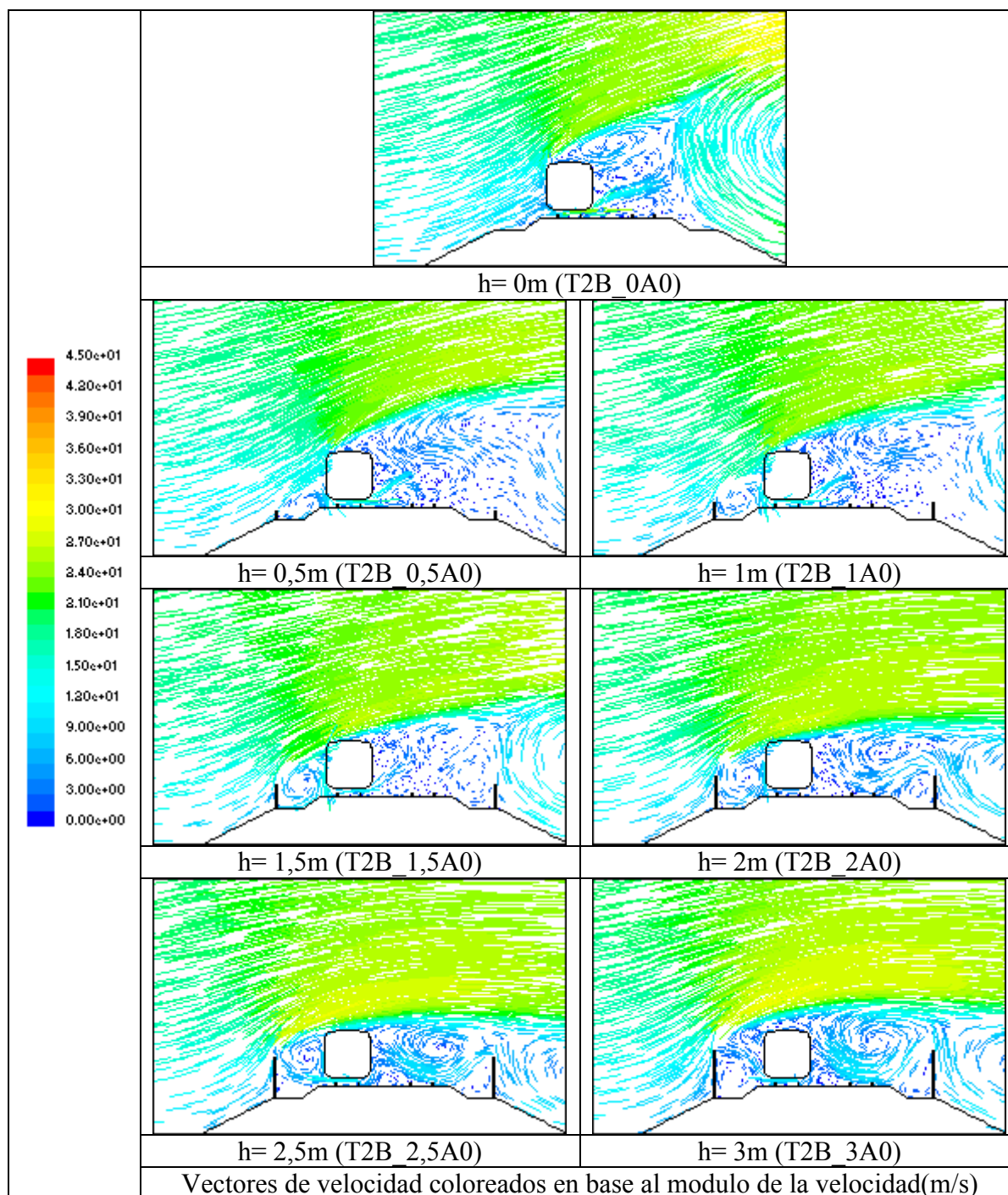


Tabla C.21: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento sobre vía en terraplén y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

BLOQUE 2.2: VIADUCTO CON TREN 102.

Mapas de presiones.

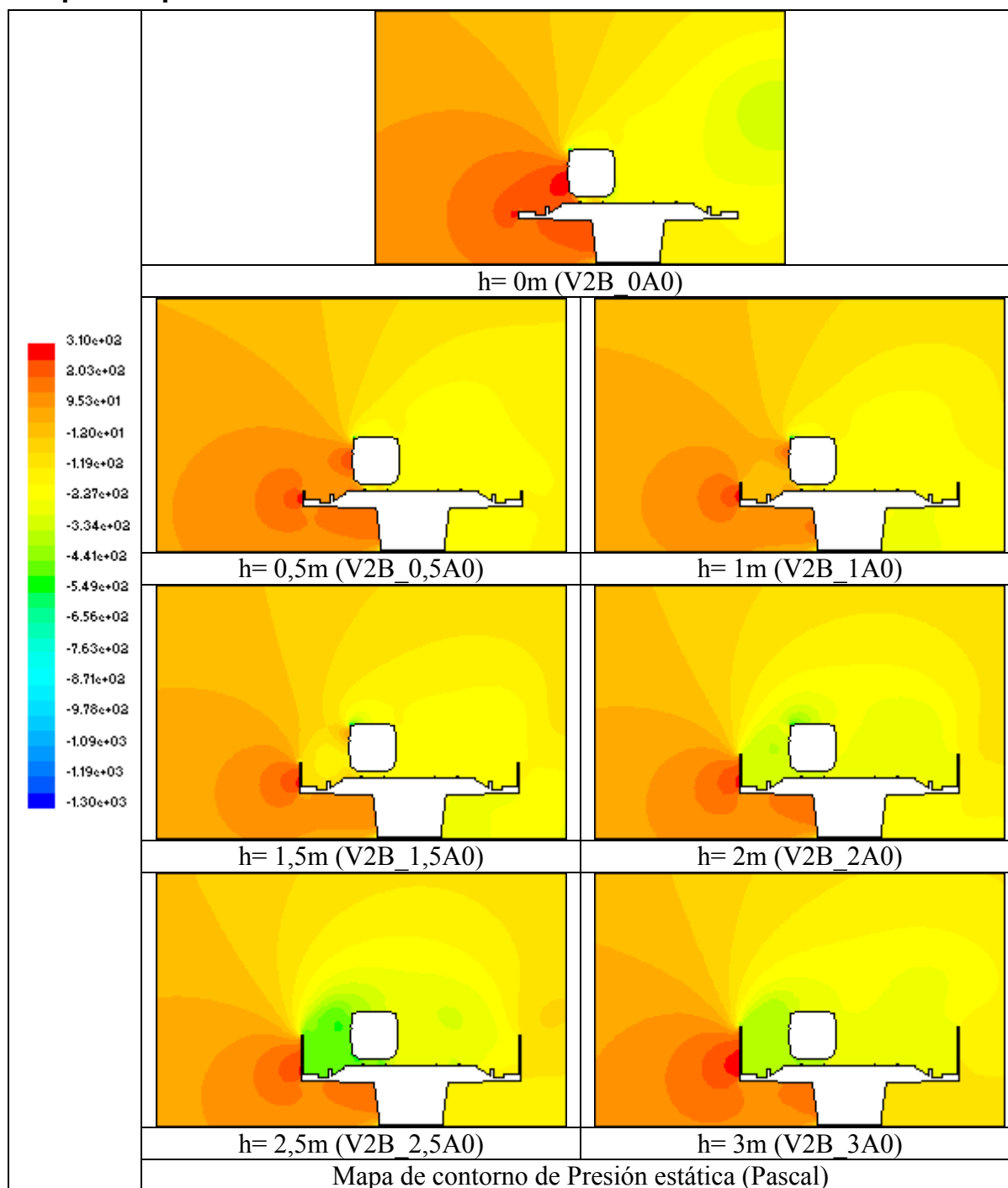


Tabla C.22: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento sobre vía en viaducto y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

Mapas de velocidades.

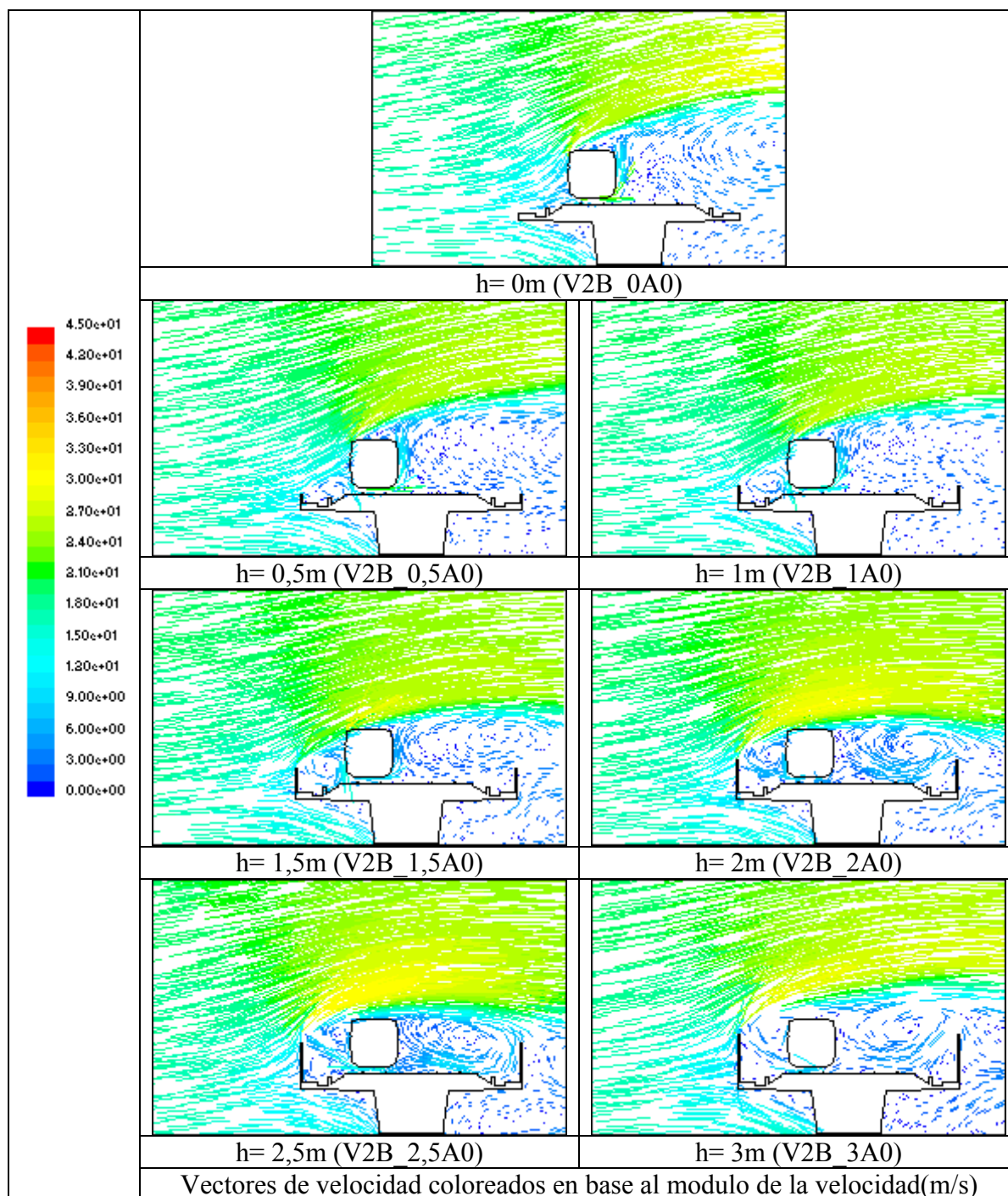


Tabla C.23: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 102 situado a barlovento sobre vía en viaducto y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

BLOQUE 2.3: TERRAPLÉN CON TREN 103.

Mapas de presiones.

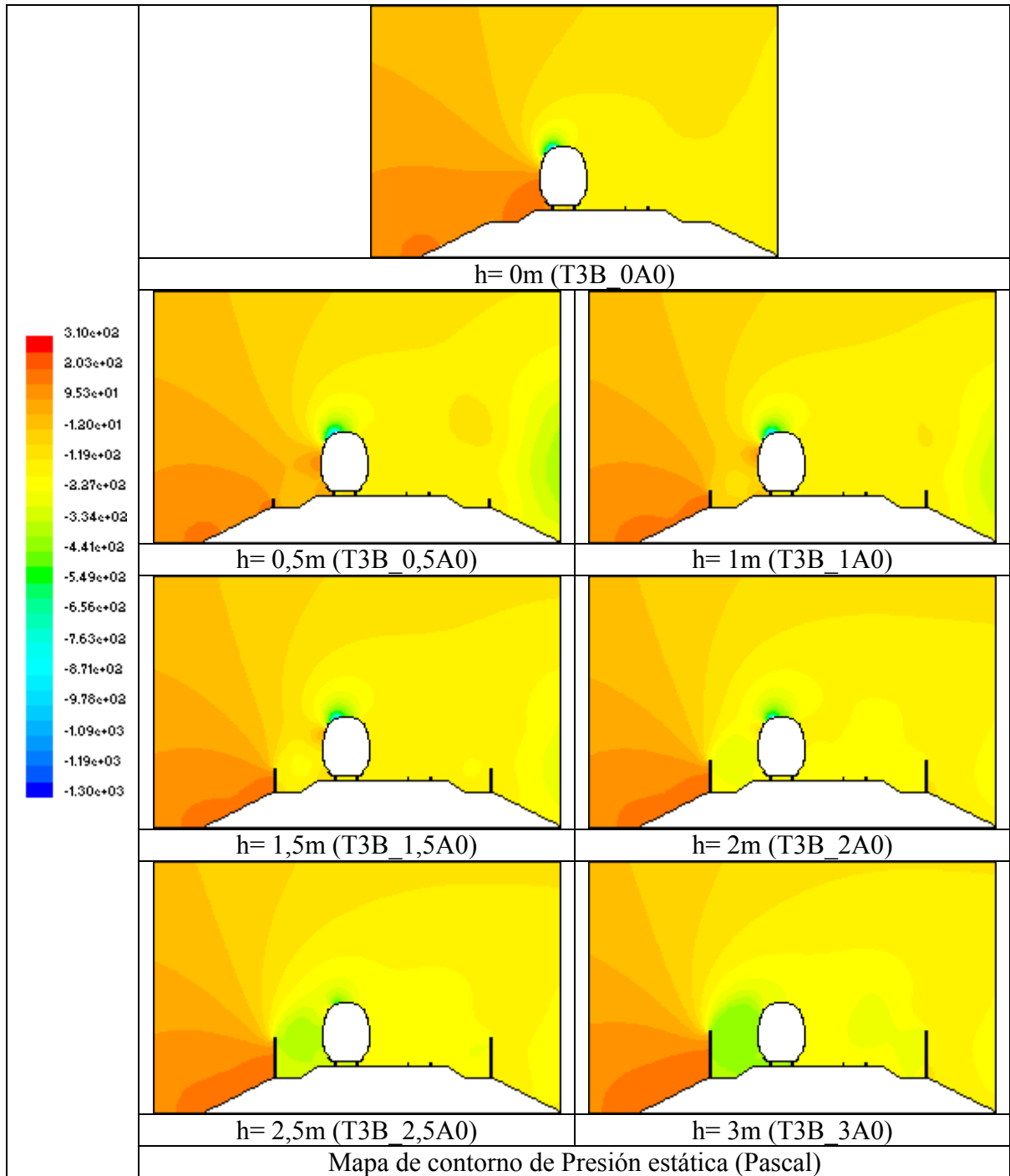


Tabla C.24: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento sobre vía en terraplén y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

Mapas de velocidades.

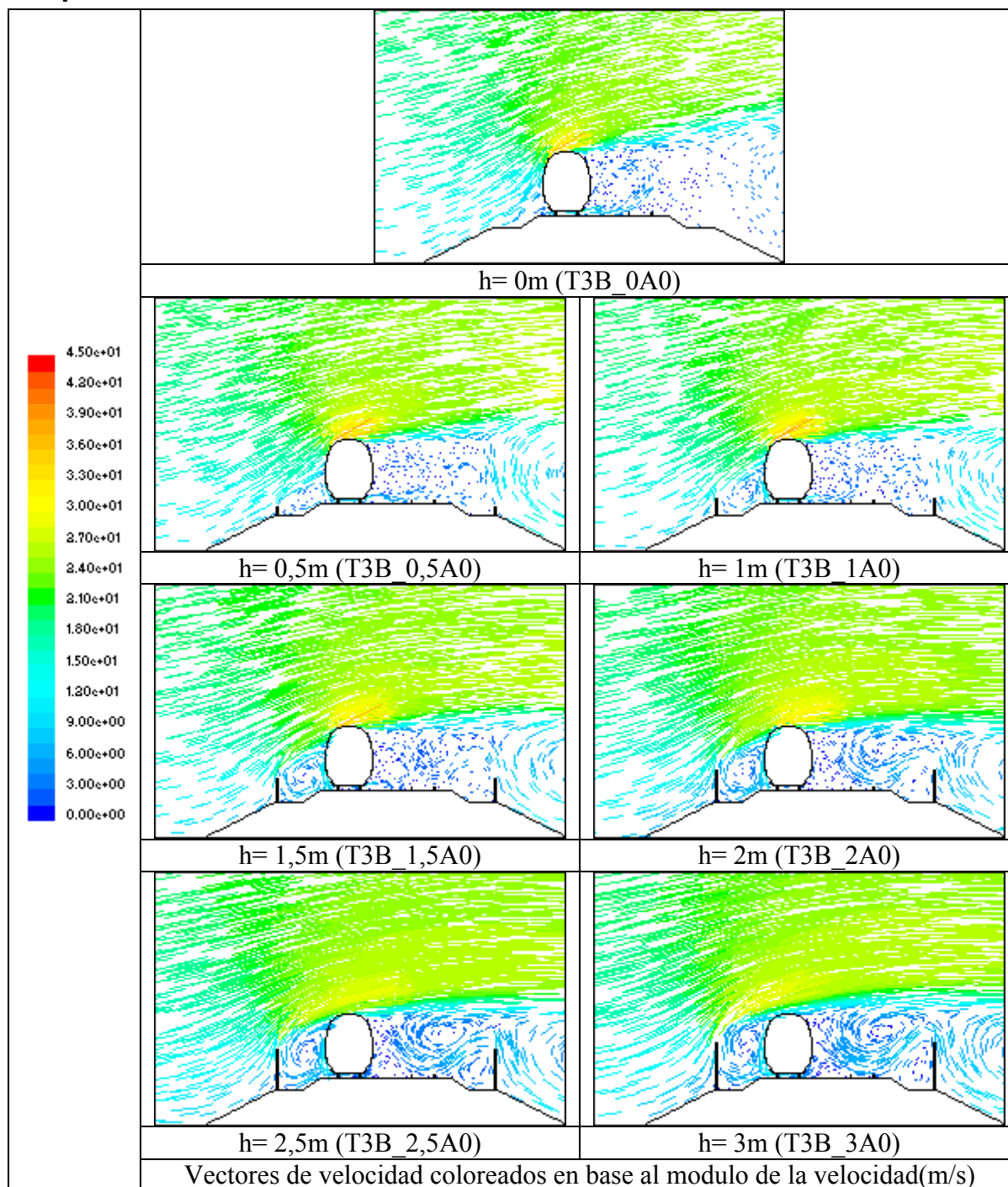


Tabla C.25: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento sobre vía en terraplén y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

BLOQUE 2.4: VIADUCTO CON TREN 103.

Mapas de presiones.

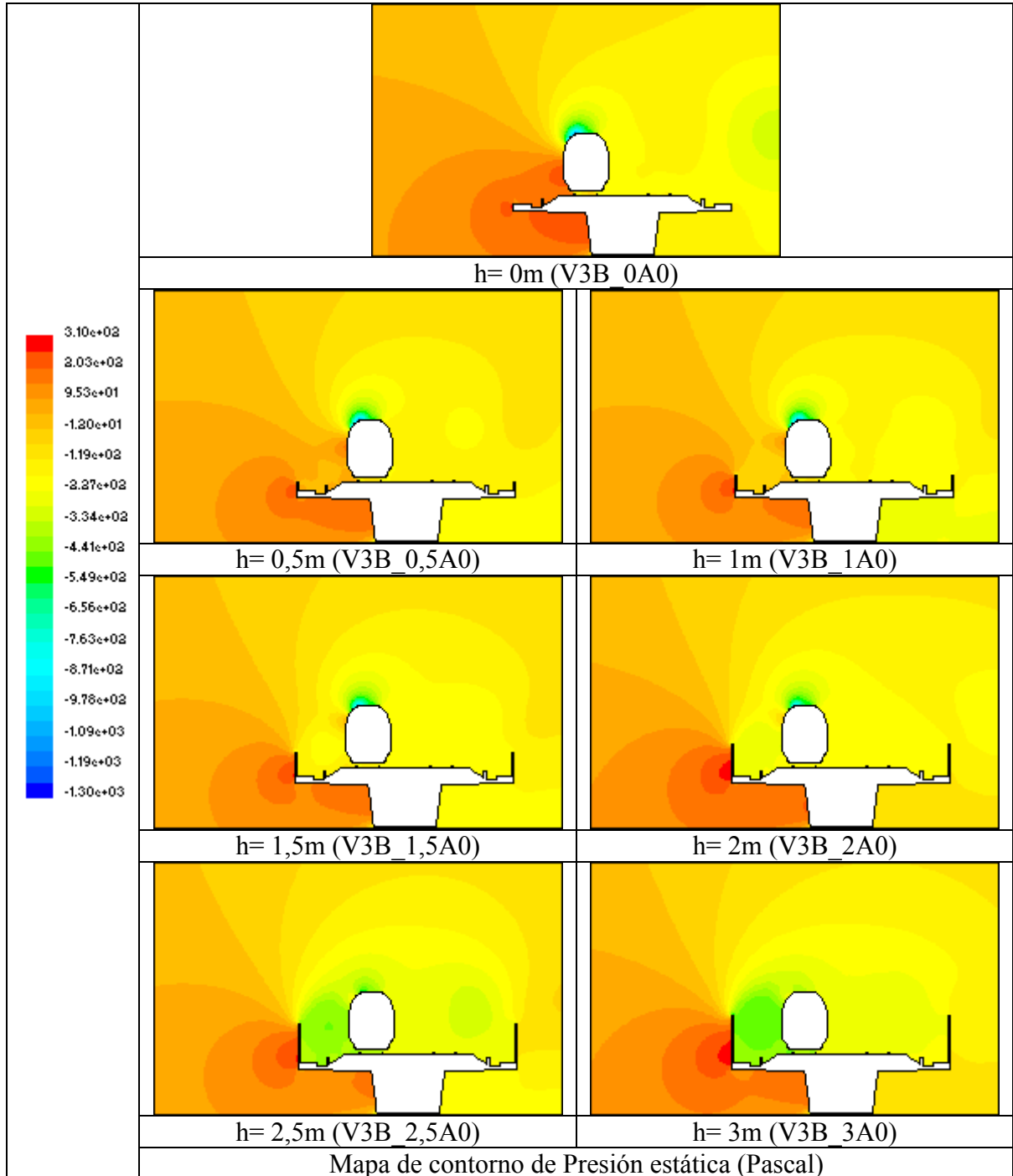


Tabla C.26: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento sobre vía en viaducto y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

Mapas de velocidades.

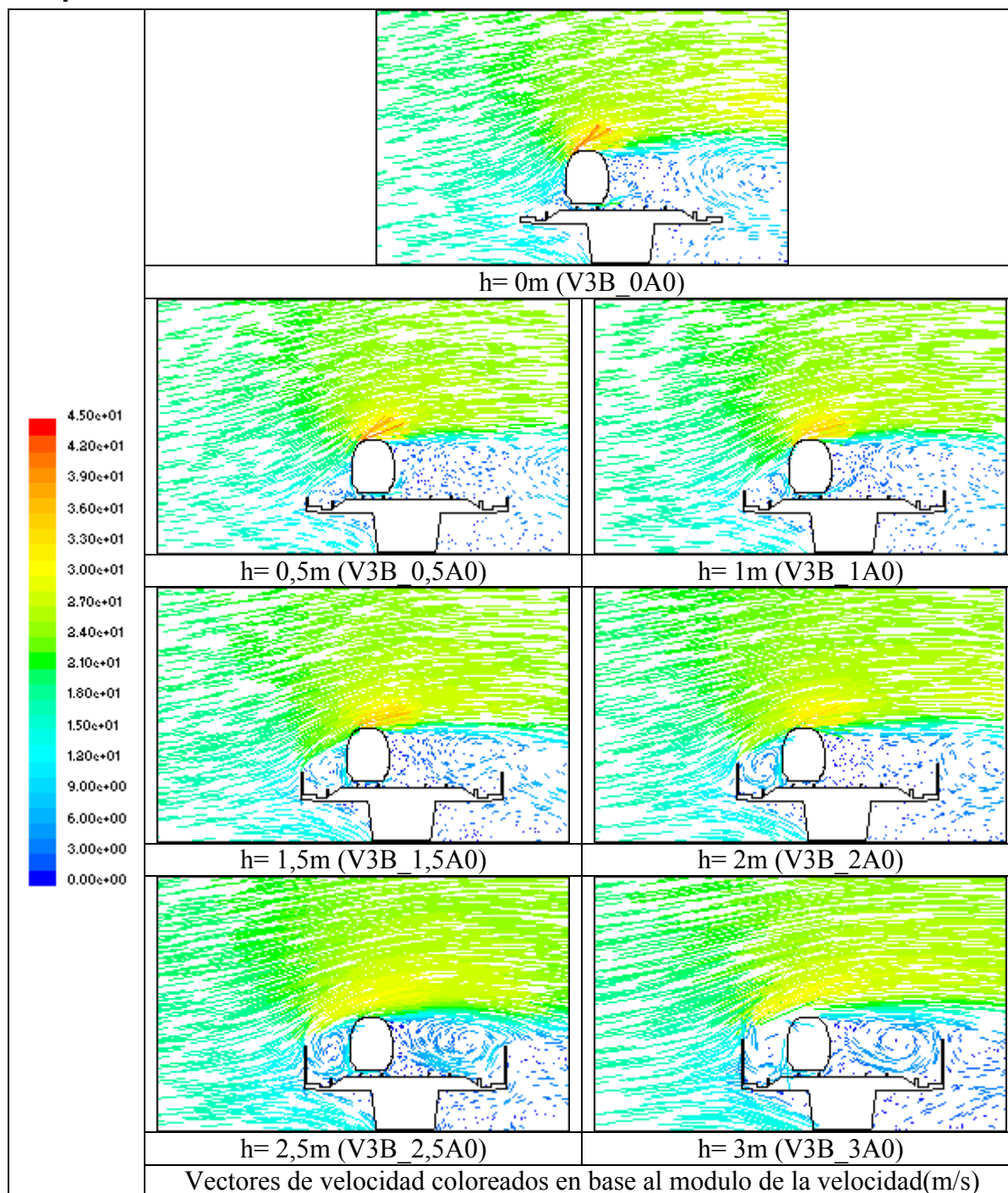


Tabla C.27: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del tren 103 situado a barlovento sobre vía en viaducto y barreras de diferentes alturas (Ensayo 2).

C.4. ENSAYO 3.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 3. La primera columna indica el bloque en el que se clasifica cada simulación, la segunda su nomenclatura y la tercera la altura de la barrera Tipo A empleada.

Bloque	Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	C_x	C_y
3.1	T2B_1,5A0	1,5	0,3470024	0,3592025
	T2S_1,5A0	1,5	-0,1852757	0,1979811
	T2B_1,75A0	1,75	0,0260440	0,4177663
	T2S_1,75A0	1,75	-0,3530042	0,0233686
3.2	T3B_1,5A0	1,5	0,0190974	0,9293339
	T3S_1,5A0	1,5	-0,1022044	0,2485022
	T3B_1,75A0	1,75	-0,0991616	0,8274146
	T3S_1,75A0	1,75	-0,2543951	0,1459041
3.3	V2B_1,5A0	1,5	0,4469187	0,4310160
	V2S_1,5A0	1,5	-0,3323709	0,0977786
	V2B_1,75A0	1,75	0,0587207	0,4959724
	V2S_1,75A0	1,75	-0,4417273	-0,0728492
3.4	V3B_1,5A0	1,5	0,0210520	1,0581977
	V3S_1,5A0	1,5	-0,2059739	0,2906621
	V3B_1,75A0	1,75	-0,0878018	0,8145558
	V3S_1,75A0	1,75	-0,3053788	0,1490928

Tabla C.28: Valores de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 3.

BLOQUE 3.1: VÍA SOBRE TERRAPLÉN CON TREN 102.

Mapa de presiones

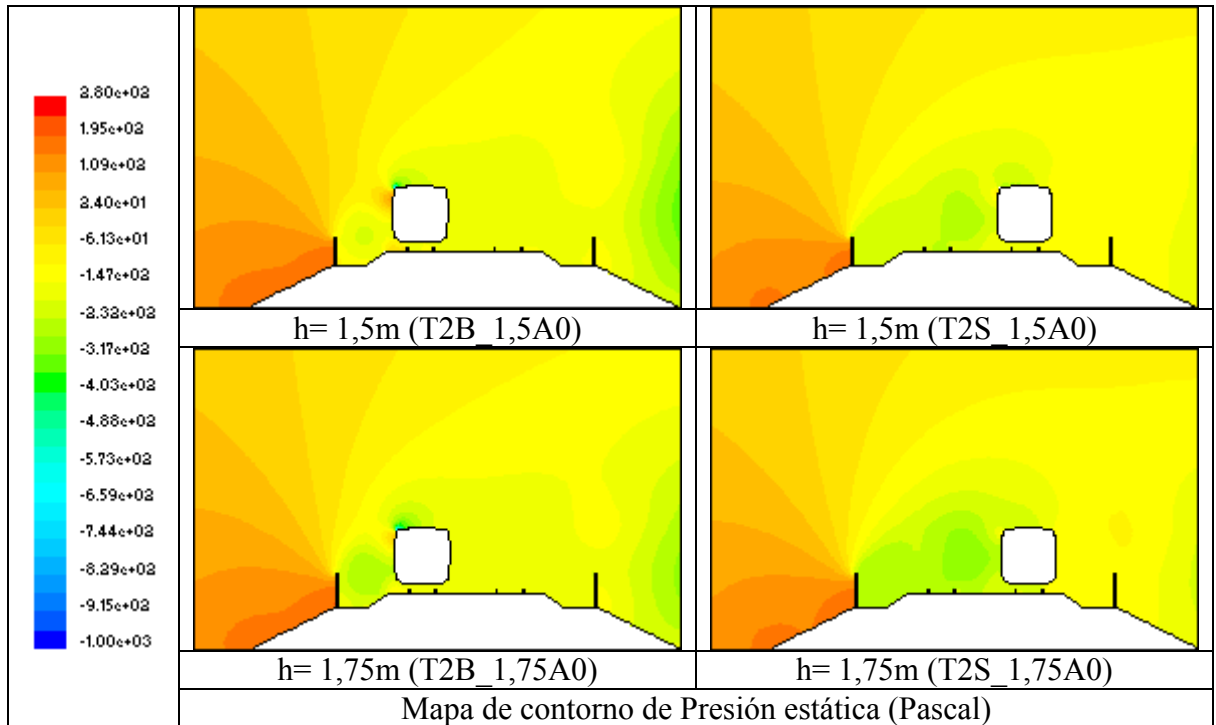


Tabla C.29: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en terraplén con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

Mapa de velocidades

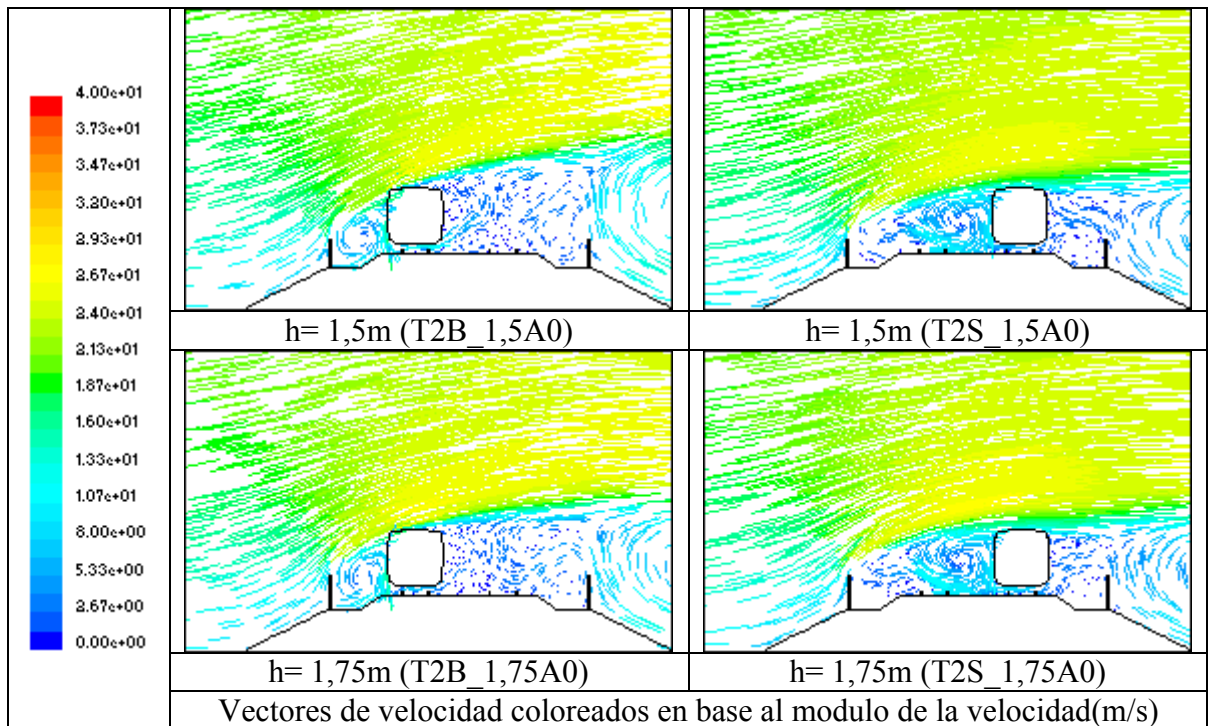


Tabla C.30: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del 102 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en terraplén con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

BLOQUE 3.2: VÍA SOBRE TERRAPLÉN CON TREN 103.

Mapa de presiones

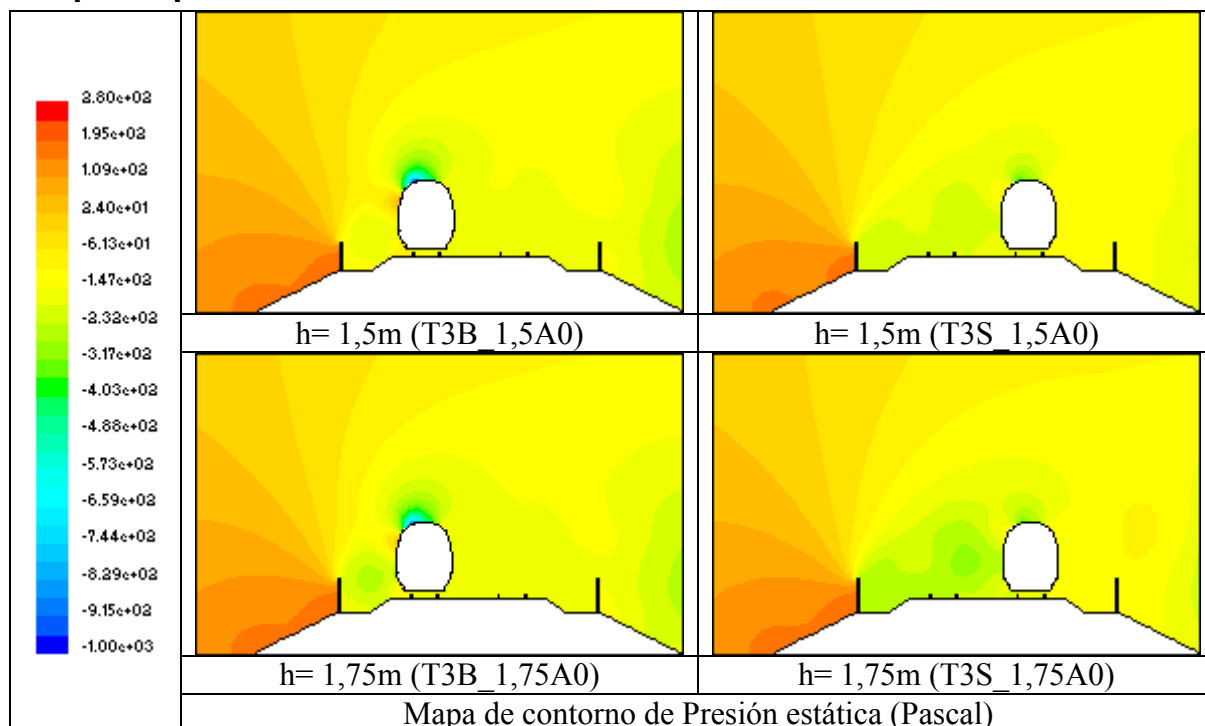


Tabla C.31: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en terraplén con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

Mapa de velocidades

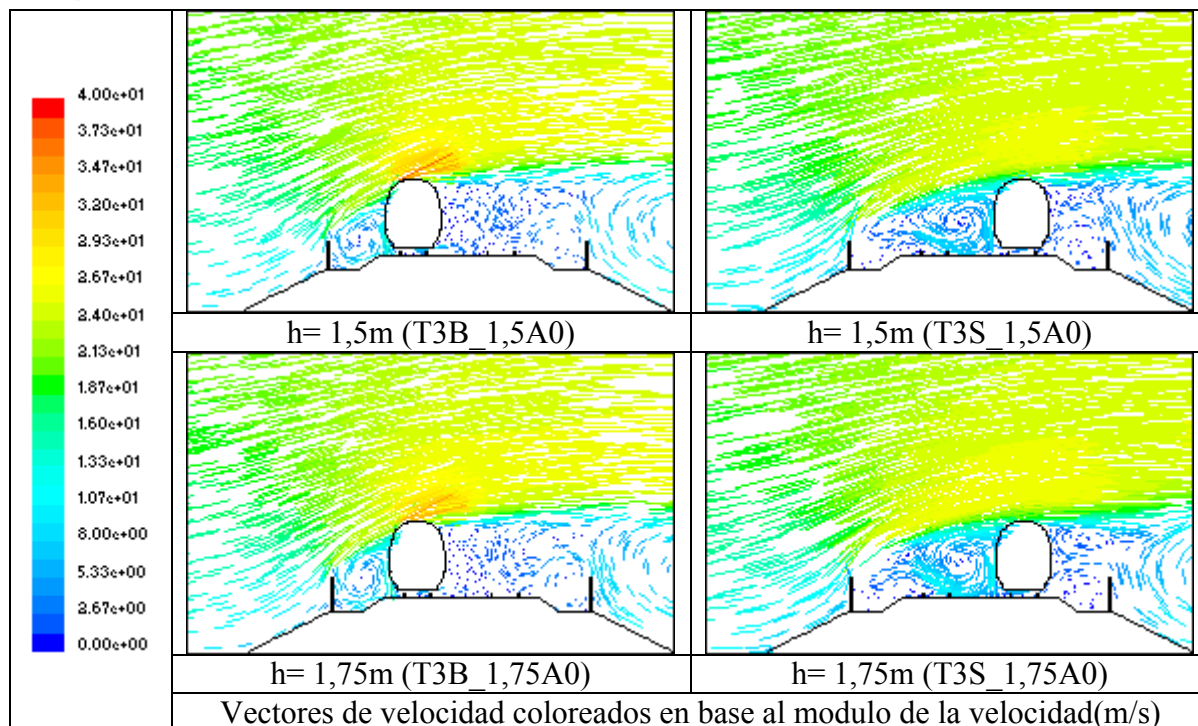


Tabla C.32: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del 103 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en terraplén con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

BLOQUE 3.3: VÍA SOBRE VIADUCTO CON TREN 102.

Mapa de presiones

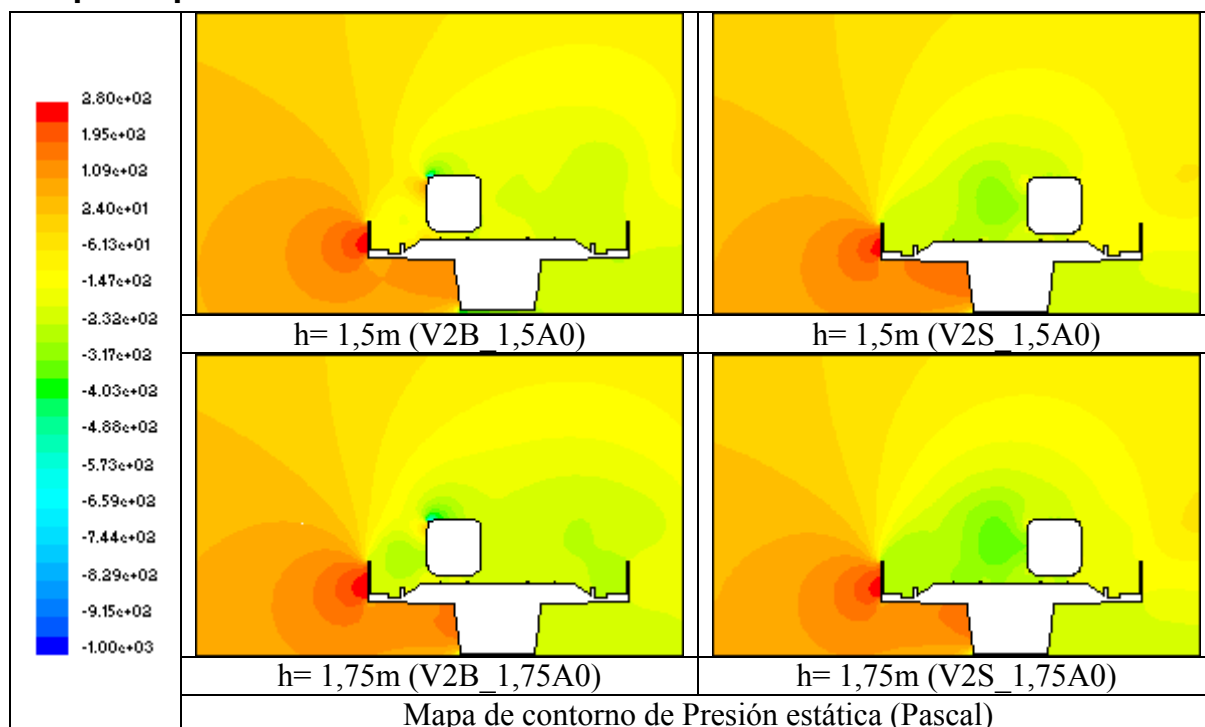


Tabla C.33: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 102 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en viaducto con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

Mapa de velocidades

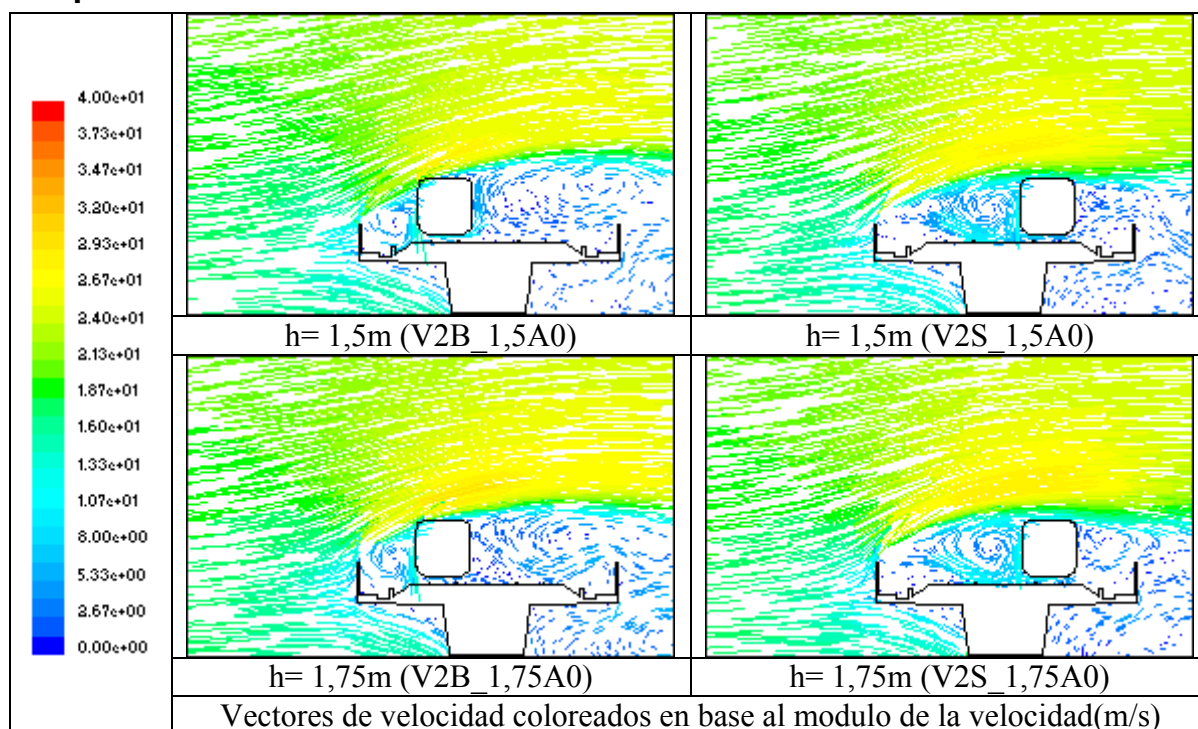


Tabla C.34: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del 102 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en viaducto con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

BLOQUE 3.4: VÍA SOBRE TERRAPLÉN CON TREN 103.

Mapa de presiones

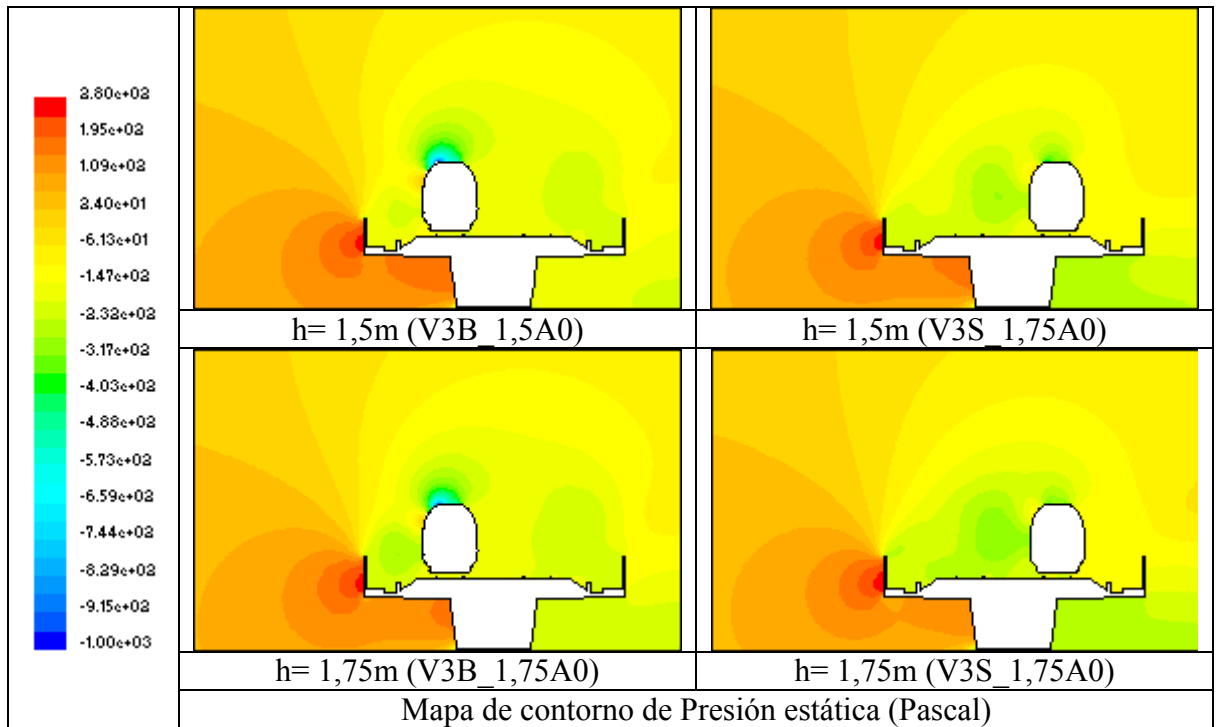


Tabla C.35: Mapas de presiones de las simulaciones del tren 103 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en viaducto con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

Mapa de velocidades

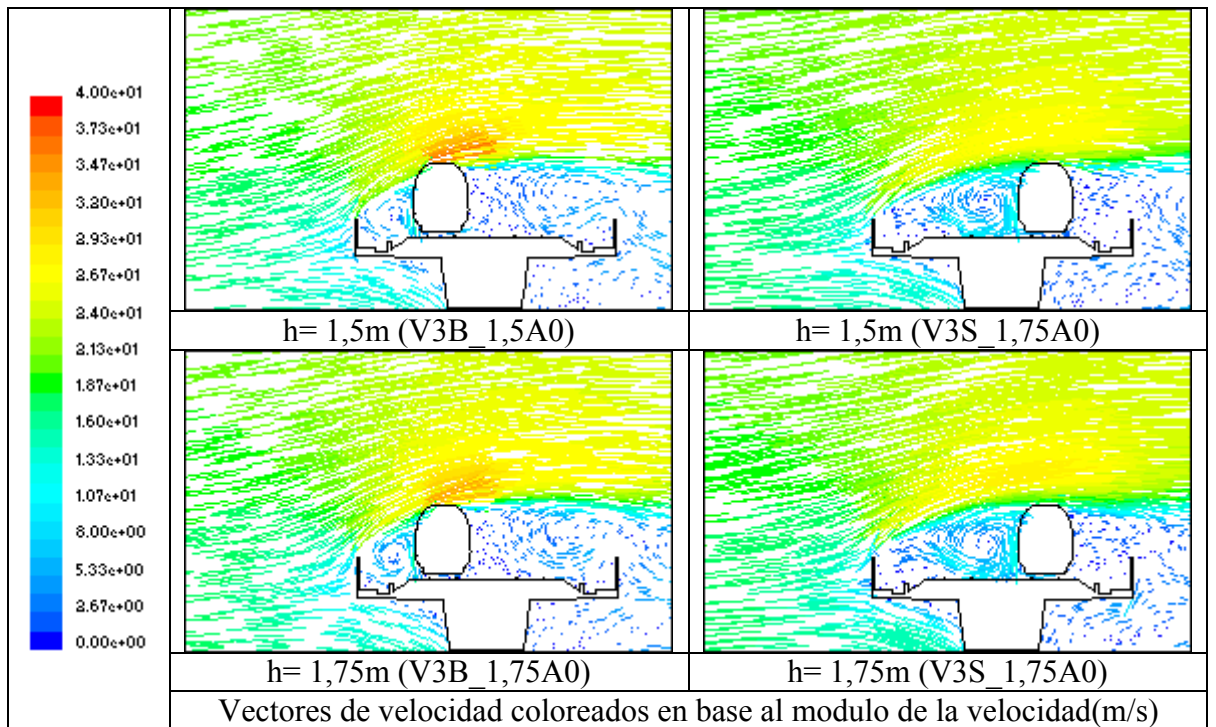


Tabla C.36: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones del 103 situado a sotavento y a barlovento, sobre vía en viaducto con barreras de 1,5 y 1,75 m de altura (Ensayo 3).

C.5. ENSAYO 4.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 4. La primera columna indica el bloque en el que se clasifica cada simulación, y la segunda su nomenclatura.

Bloque	Nomenclatura de la simulación.	C_x tren a barlovento	C_x tren a sotavento	C_y tren a barlovento	C_y tren a barlovento
4.1	T22_1,5A0	0,41009495	-0,01533704	0,29410414	-0,03156565
	T23_1,5A0	0,40686406	-0,04418438	0,30273606	-0,03796798
	T32_1,5A0	0,03082803	-0,09643534	0,91311798	0,01889692
	T33_1,5A0	-0,00343566	-0,05310773	0,89192827	0,0692915
4.2	V22_1,5A0	0,42391884	-0,03059157	0,43491552	-0,01510631
	V23_1,5A0	0,5047162	-0,01900128	0,45934078	0,06875234
	V32_1,5A0	0,07894988	-0,18904737	1,11817588	0,08558824
	V33_1,5A0	0,03475538	-0,148996	0,94823475	0,15776348

Tabla C.37: Valores de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 4.

BLOQUE 4.1: VÍA SOBRE TERRAPLÉN CON TRENES 102 Y 103.

Mapa de presiones

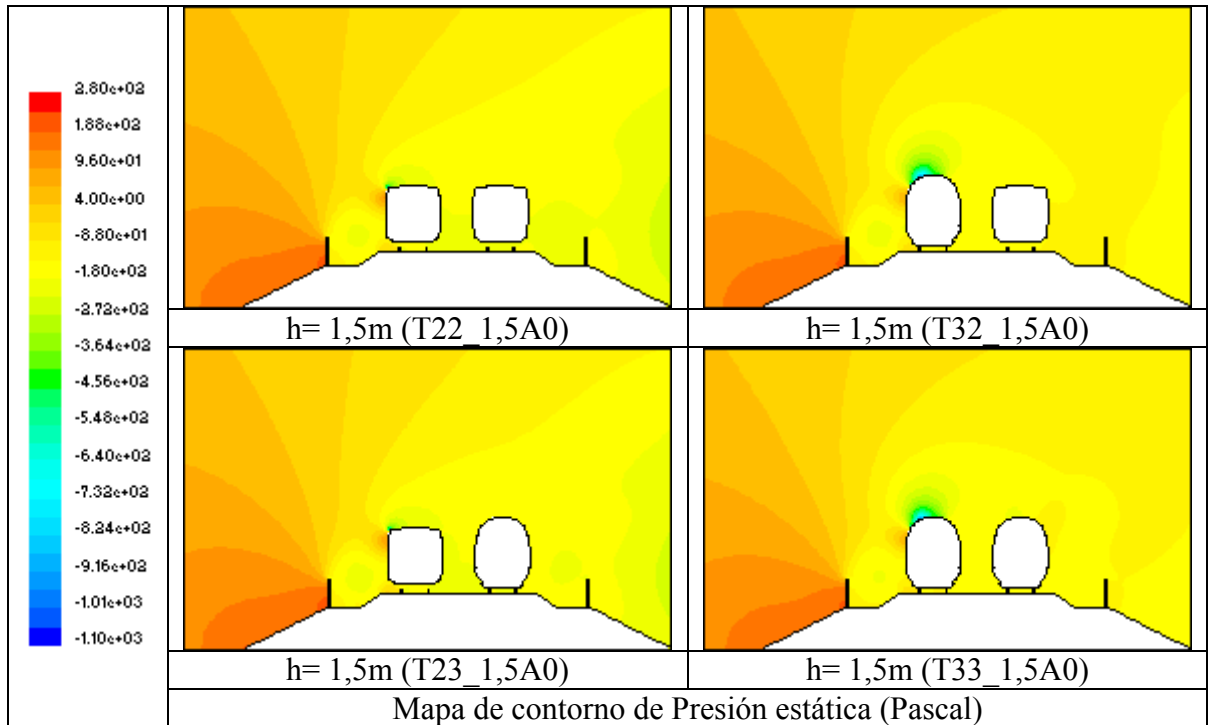


Tabla C.38: Mapas de presiones de las simulaciones sobre vía en terraplén (Ensayo 4).

Mapa de velocidades

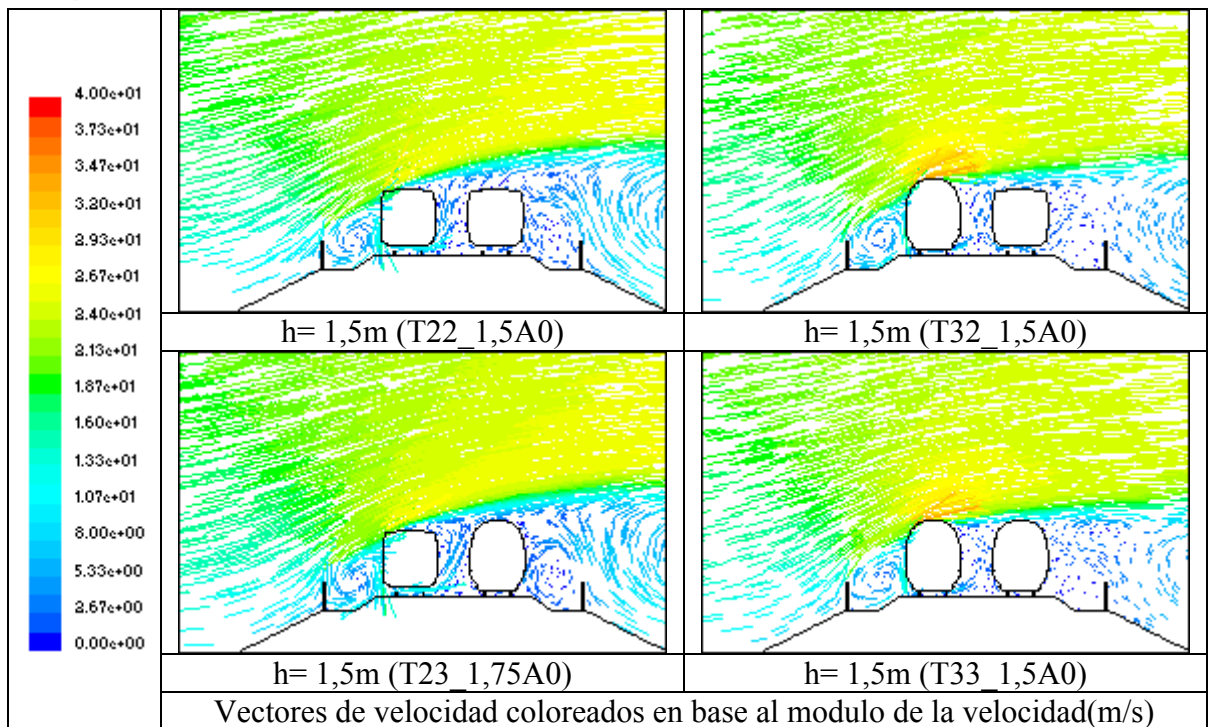


Tabla C.39: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones sobre vía en terraplén (Ensayo 4).

BLOQUE 4.2: VÍA SOBRE VIADUCTO CON TRENES 102 Y 103.

Mapa de presiones

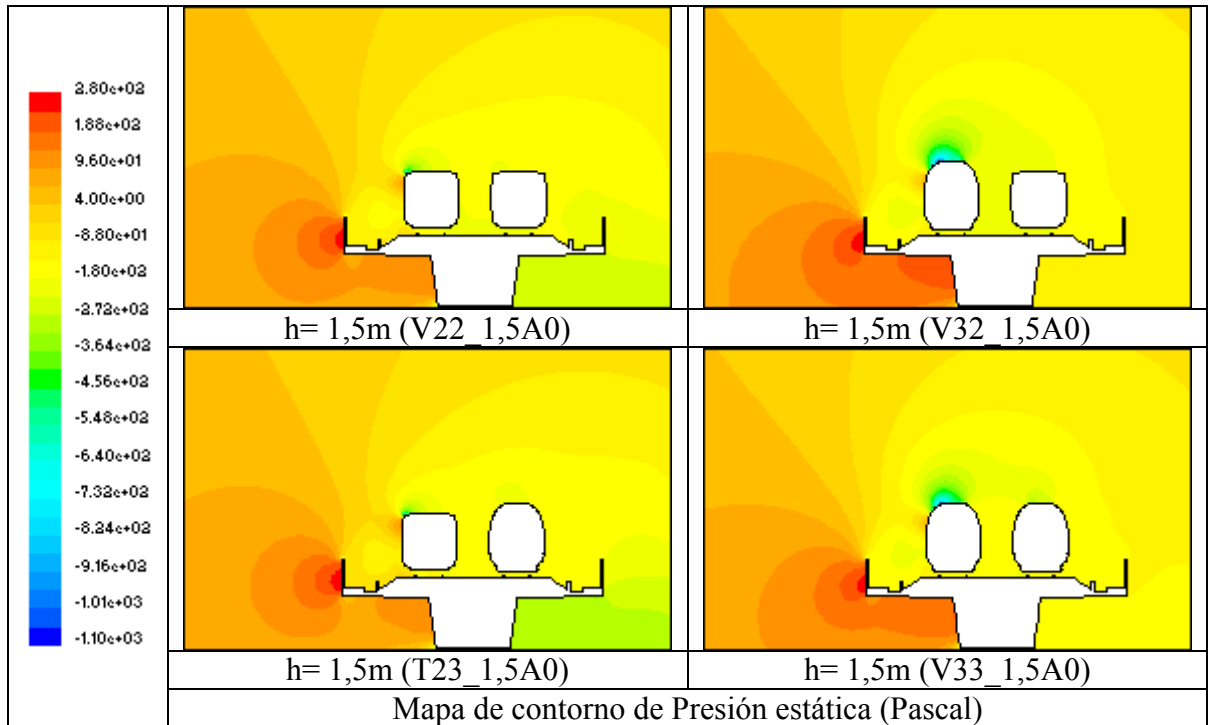


Tabla C.40: Mapas de presiones de las simulaciones sobre vía en viaducto (Ensayo 4).

Mapa de velocidades

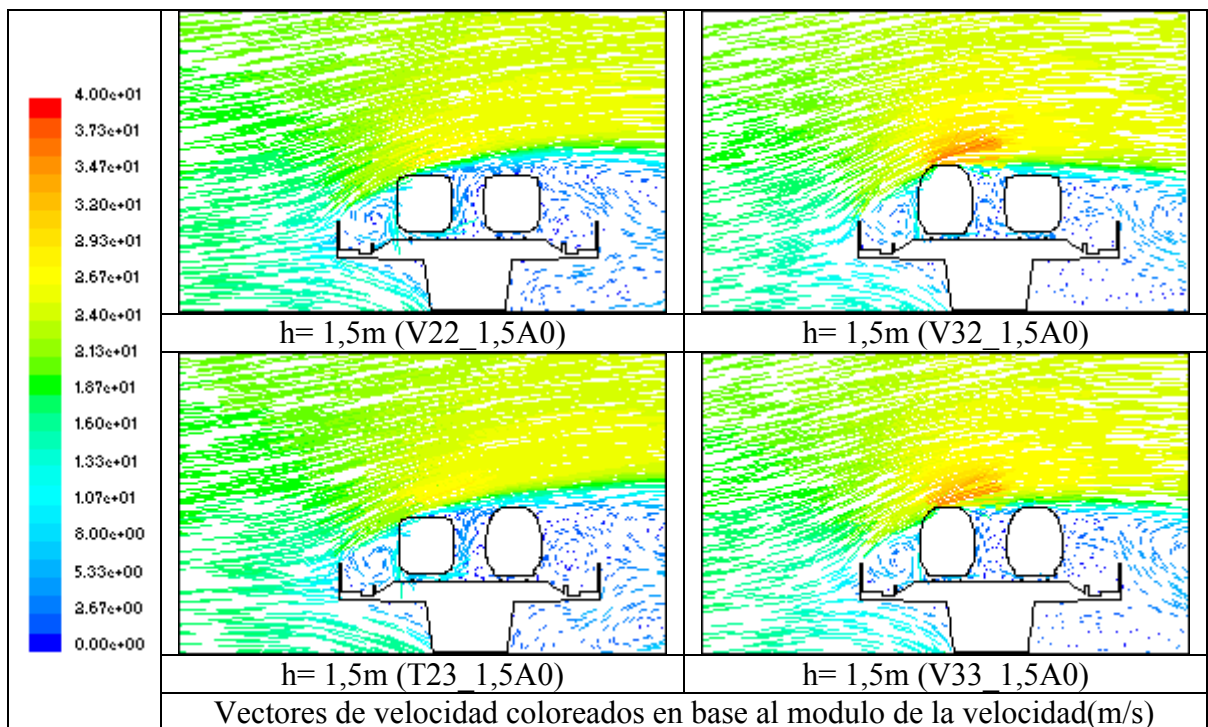


Tabla C.41: Mapas de vectores de velocidad de las simulaciones sobre vía en viaducto (Ensayo 4).

ANEXO D

ANEXO D. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN.

Este anexo recoge los resultados más importantes de los ensayos de optimización, tanto en viaducto como en terraplén. Se presentan en tablas los datos más representativos. Este estudio de optimización está dividido en cuatro ensayos, dos en viaducto, y dos en terraplén, cada uno con sus objetivos específicos definidos en la memoria.

En total se recogen en este anexo los resultados de 96 simulaciones, clasificadas cada una de ellas por ensayo y nomenclatura.

D.1. ENSAYO 5.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de fuerza por unidad de longitud sobre el tren en el eje horizontal y vertical, y de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 5. La primera columna indica la nomenclatura de cada simulación.

Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	F_x	F_y	C_x	C_y
V2B_0A0	0	1354,619	311,92995	1,81280562	0,417437196
V3B_0A0	0	854,73967	956,25658	0,94545619	1,057747442
V2S_0A0	0	1072,013	237,02512	1,43461091	0,317196547
V3S_0A0	0	804,36275	821,31072	0,88973259	0,90847931
V2B_1,5A0	1,5	194,36804	443,88526	0,26011112	0,594025105
V3B_1,5A0	1,5	538,90507	753,08505	0,59610096	0,833012604
V2S_1,5A0	1,5	-208,5352	82,164901	-0,27907021	0,109956374
V3S_1,5A0	1,5	113,39282	308,20722	0,12542759	0,340918334
V2B_1,75A0	1,75	5,1037867	498,85161	0,00683009	0,667583285
V3B_1,75A0	1,75	225,60205	658,18613	0,24954598	0,728041734
V2S_1,75A0	1,75	-380,8098	-51,77935	-0,50961503	-0,06929321
V3S_1,75A0	1,75	-147,3763	260,16256	-0,16301787	0,287774526
V2B_2A0	2	-169,34	326,42601	-0,22661758	0,436836414
V3B_2A0	2	-98,94361	445,94515	-0,10944484	0,493274874
V2S_2A0	2	-506,916	-206,0702	-0,67837534	-0,27577148
V3S_2A0	2	-307,7886	117,7149	-0,34045532	0,13020839

Tabla D.1: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 5.

D.2. ENSAYO 6.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de fuerza por unidad de longitud sobre el tren en el eje horizontal y vertical, y de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 6. La primera columna indica la nomenclatura de cada simulación.

Este ensayo se ha dividido en tres apartados:

6.a) Ensayos de barreras con alero en viaducto.

Nomenclatura de la simulación.	F_x	F_y	C_x	C_y
V2B_1,5BP	67,226004	456,922415	0,08996454	0,61147195
V2B_1,5BN	962,94741	287,729335	1,28865495	0,38505097
V2B_2BP	-297,05363	31,9108005	-0,39752911	0,04270432
V2B_1BP	517,3877	344,46643	0,69238903	0,46097883
V2S_1,5BP	-255,841825	-4,26300405	-0,34237782	-0,00570492
V2S_1,5BN	85,9644045	373,502235	0,11504102	0,49983571
V2S_2BP	-553,74278	-304,42779	-0,74104086	-0,40739751
V2S_1BP	400,42457	429,90256	0,53586426	0,57531289
V3B_1,5BP	354,322135	638,72263	0,39192759	0,7065125
V3B_1,5BN	633,293745	840,981735	0,70050743	0,93023808
V3S_1,5BP	-110,684285	320,19193	-0,1224316	0,35417502
V3S_1,5BN	302,18736	581,19582	0,33425957	0,64288017

Tabla D. 2: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 6.a), ensayo de barreras con aleros.

6.b) Ensayo de barreras con hueco inferior en viaducto.

Nomenclatura de la simulación.	F_x	F_y	C_x	C_y
V2B_1,5C0,2	392,068965	408,008745	0,52468246	0,54601371
V2B_1,5C0,4	627,6653	404,8514	0,83996695	0,54178842
V2B_2C0,2	75,505342	299,76829	0,10104429	0,40116198
V2B_2C0,4	352,867125	330,842385	0,47222098	0,44274658
V2S_1,5C0,2	65,74656	269,4088	0,08798469	0,36053369
V2S_1,5C0,4	284,226505	393,882955	0,38036334	0,52711001
V2S_2C0,2	9,07482285	134,94305	0,01214429	0,18058622
V2S_2C0,4	37,5652245	189,86592	0,05027129	0,25408621
V3B_1,5C0,2	618,687565	714,47239	0,68435105	0,79030185
V3B_1,5C0,4	467,89166	675,395855	0,51755064	0,74707799
V3B_2C0,2	128,527955	373,621025	0,14216908	0,41327474
V3S_1,5C0,2	314,745775	362,486565	0,34815085	0,40095854
V3S_1,5C0,4	343,393275	504,853785	0,37983881	0,55843569
V3S_2C0,2	-2,6198054	333,525415	-0,00289785	0,36892364

Tabla D. 3: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 6.b), ensayo de barreras con hueco inferior.

6.c) Ensayo de barreras con alero y hueco inferior en viaducto.

Nomenclatura de la simulación.	F_x	F_y	C_x	C_y
V2B_1,5C0,2	56,3766415	224,01429	0,07544549	0,29978493
V2B_1,5C0,4	27,5083415	79,073189	0,03681277	0,10581892
V2B_2C0,2	41,555032	351,80477	0,04596541	0,38914305
V2B_2C0,4	-45,925483	108,56669	-0,05079972	0,12008925

Tabla D. 4: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 6.c), ensayo de barreras con alero y hueco inferior.

D.3. ENSAYO 7.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de fuerza por unidad de longitud sobre el tren en el eje horizontal y vertical, y de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 7. La primera columna indica la nomenclatura de cada simulación.

Nomenclatura de la simulación.	Altura (h)	F_x	F_y	C_x	C_y
T2B_0A0	0	1014,10885	203,219655	1,357121245	0,271956715
T3B_0A0	0	663,49707	670,509725	0,733916343	0,741673276
T2S_0A0	0	901,286075	218,832275	1,20613727	0,292850151
T3S_0A0	0	564,7061	581,52203	0,624640341	0,643241004
T2B_1,5A0	1,5	342,55586	261,398755	0,458422027	0,349814326
T3B_1,5A0	1,5	230,68543	548,631735	0,255168884	0,606859947
T2S_1,5A0	1,5	-146,606185	-98,3812305	-0,196194292	-0,13165772
T3S_1,5A0	1,5	-81,16385	260,726135	-0,089778054	0,288397915
T2B_1,75A0	1,75	74,7238555	317,92413	0,099998468	0,425458856
T3B_1,75A0	1,75	55,001555	558,112205	0,060839063	0,617346612
T2S_1,75A0	1,75	-278,662615	-23,248512	-0,372917518	-0,03111209
T3S_1,75A0	1,75	-231,85177	146,53059	-0,256459012	0,162082396
T2B_2A0	2	-119,18229	218,509875	-0,159494533	0,292418702
T3B_2A0	2	-95,9412365	437,36327	-0,106123817	0,483782169
T2S_2A0	2	-364,62575	-133,30728	-0,487956842	-0,17839716
T3S_2A0	2	-346,476755	52,293234	-0,383249549	0,057843298

Tabla D.5: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 7.

D.4. ENSAYO 8.

La siguiente tabla recoge los valores numéricos de fuerza por unidad de longitud sobre el tren en el eje horizontal y vertical, y de los coeficientes C_x y C_y obtenidos en el ensayo 8. La primera columna indica la nomenclatura de cada simulación.

Nomenclatura de la simulación.	F_x	F_y	C_x	C_y
T2B_1,5BP	-29,1983655	358,736805	-0,03907443	0,48007602
T2S_1,5BP	-225,064115	38,9838795	-0,30118985	0,0521698
T3B_1,5BP	42,778633	460,709375	0,04731888	0,50960608
T3S_1,5BP	-121,54682	215,008215	-0,13444701	0,23782779
T2B_1,25BP	178,25121	332,53083	0,23854294	0,44500613
T2S_1,25BP	-120,779915	159,45867	-0,16163254	0,213394
T3B_1,25BP	179,07093	545,171965	0,19807636	0,60303298
T3S_1,25BP	14,2550725	283,70195	0,01576801	0,31381223
T2B_1,75C0,2	189,205265	335,448695	0,25320209	0,44891093
T2S_1,75C0,2	-64,0064435	130,87205	-0,085656	0,17513824
T3B_1,75C0,2	261,61723	472,44743	0,28938358	0,52258993
T3S_1,75C0,2	51,551816	141,37056	0,05702319	0,15637471
T2B_2C0,2	36,9609245	330,267435	0,0494626	0,44197716
T2S_2C0,2	-119,436995	40,5013635	-0,15983539	0,05420055
T3B_2C0,2	164,068935	382,405865	0,18148215	0,42299194
T3S_2C0,2	-91,373674	162,664665	-0,10107148	0,17992884
T2B_2,2C0,25	-27,626457	314,45987	-0,03697084	0,42082284
T2S_2,2C0,25	-89,8508675	81,970854	-0,12024204	0,10969669
T3B_2,2C0,25	71,230744	340,70738	0,07879071	0,37686785
T3S_2,2C0,25	-149,281005	83,456044	-0,16512472	0,09231353
T2B_2,2C0,3	34,872675	329,11406	0,04666802	0,44043367
T2S_2,2C0,3	-47,821629	101,318325	-0,06399683	0,13558826
T3B_2,2C0,3	126,588865	359,65972	0,14002419	0,39783167
T3S_2,2C0,3	-88,590848	150,028675	-0,09799331	0,16595174
T2B_2D0,2	-93,093251	259,253555	-0,12458113	0,34694353
T2S_2D0,2	-149,79799	-4,5684697	-0,20046569	-0,00611371
T3B_2D0,2	17,798698	308,704905	0,01968774	0,34146884
T3S_2D0,2	-156,548365	120,842611	-0,17316339	0,13366806
T2B_2D0,25	-51,0640065	275,078435	-0,06833591	0,36812102
T2S_2D0,25	-91,43327	33,231073	-0,12235968	0,04447116
T3B_2D0,25	87,5632135	336,69141	0,0968566	0,37242565
T3S_2D0,25	36,0578046	136,6013	0,03988475	0,15109928

Tabla D.6: Valores de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos obtenidos en el ensayo 8.

